L22DC

Proponente:
INFRASTRUCTURE
ITALIA LAND 2 S.r.l.
Via del Bosco Rinnovato, 6
20057 – Assago (MI), Italia

STACK INFRASTRUCTURE

Progetto Nuovo Data Center Campus Siziano

VALUTAZIONE IMPATTO AMBIENTALE
ai sensi del Titolo III del d.lgs. 152/2006

Studio di impatto sul microclima dell'esercizio dei Datacenter

---

Documento
4553-L22-ZZ-ZZZ-TRP-GE-0059

Data
30 giugno 2026

Revisione
V.00

Alvea

Environment,
Your Next
Asset

Progetto: 26.051.01.P

VALUTAZIONE DI IMPATTO AMBIENTALE

ai sensi degli artt. 23 del D.Lgs. 152/06

Progetto Nuovo Data Center Campus Siziano (PV)

STUDIO DI IMPATTO SUL MICROCLIMA DELL'ESERCIZIO DEI DATACENTER

Preparato per: Lombardini22

Data: 30/06/2026

0

VALUTAZIONE DI IMPATTO AMBIENTALE (VIA) DATA CENTER CAMPUS SIZIANO

Studio di impatto sul microclima dell’esercizio dei Datacenter

Rev:	data	emissione	note
0	30/06/2026		

Redatto	Verificato	Approvato
Ing. C. Grassi	L. Pessina	P. Mauri

Sommario

1 INTRODUZIONE 6
1.1 Review tecnica di settore 7
2 PRINCIPI TEORICI DEI MODELLI A BOX 9
2.1 Generalità 9
2.2 Conservazione della massa 9
2.3 Conservazione dell'energia 10
2.4 Propagazione verticale dell'effetto termico 10
2.5 Propagazione orizzontale su griglia di calcolo 11
2.6 Influenza della stabilita atmosferica 12
3 DESCRIZIONE DEL MODELLO A BOX 13
3.1 Generalità 13
3.2 Struttura generale del programma 13
3.3 File di configurazione 14
3.4 Acquisizione dei dati meteorologici 14
3.5 Gestione dei profili verticali e della griglia spaziale 15
3.6 Calcoli termoigrometrici e produzione degli output 15
4 APPROFONDIMENTI 16
4.1 Definizione della griglia 5 x 5 16
4.2 Assegnazione delle potenze alle celle 17
4.3 Condizioni meteorologiche comuni alla griglia 17
4.4 Redistribuzione laterale e ruolo del vento 18
4.5 Quota di emissione e profilo verticale 18
5 IPOTESI, LIMITI E CONTROLLI NUMERICI 19
5.1 Ipotesi principali 19
5.2 Controllo energetico 19
5.3 Interpretazione dei risultati 19
6 CASO DI STUDIO 21
6.1 Rilascio di calore 21
6.2 Rilascio di vapore acqueo 22
7 APPLICAZIONE DEL CODICE CALMET 25
8 APPLICAZIONE del MODELLO A BOX 30
8.1 Risultati 31

8.2 Effetti cumulati 41
9 CONCLUSIONI 42
10 BIBLIOGRAFIA 45

Indice Figure

Figura 1 rappresentazione schematica della griglia del modello a box. 17

Figura 2 localizzazione dei datacenter oggetto dello studio. 21

Figura 3 dominio di calcolo di CALMET su griglia con passo di 400 metri. 25

Figura 4 griglia di calcolo di dimensioni 5 celle per 5 celle di 400 metri. 30

Figura 5 variazione media mensile (mese 1-Gennario – mese 12 Dicembre) della temperatura dell'aria per ogni cella del dominio di calcolo. 32

Figura 6 variazione media mensile (mese 1-Gennario – mese 12 Dicembre) della umidità relativa per ogni cella del dominio di calcolo. 33

Figura 7 variazione di temperatura media mensile, massima oraria e minima oraria per la cella R4C4 relativa alle emissioni di MIL 8 e 50% di MIL07. 34

Figura 8 variazione di temperatura media mensile, massima oraria e minima oraria per la cella R3C4 relativa alle emissioni di MIL 3 e 50% di MIL07. 34

Figura 9 variazione di temperatura media mensile, massima oraria e minima oraria per la cella R2C2 relativa alle emissioni di MIL 1. 35

Figura 10 variazione di temperatura media mensile, massima oraria e minima oraria per la cella R3C2 relativa alle emissioni di MIL 2. 35

Figura 11 variazione di temperatura media mensile per la cella R4C4 relativa alle emissioni di MIL 8 e 50% di MIL07 per il mese di Gennaio. 37

Figura 12 variazione di temperatura media mensile per la cella R4C4 relativa alle emissioni di MIL 8 e 50% di MIL07 per il mese di Agosto. 37

Figura 13 variazione di temperatura media mensile per la cella R2C2 relativa alle emissioni di MIL 1 per il mese di Gennaio. 38

Figura 14 variazione di temperatura media mensile per la cella R2C2 relativa alle emissioni di MIL 1 per il mese di Agosto. 38

Figura 15 variazione di temperatura media mensile per la cella R3C2 relativa alle emissioni di MIL 2 per il mese di Gennaio. 39

Figura 16 variazione di temperatura media mensile per la cella R3C2 relativa alle emissioni di MIL 2 per il mese di Agosto. 39

Figura 17 variazione di temperatura media mensile per la cella R3C4 relativa alle emissioni di MIL 3 e 50% MIL07 per il mese di Gennaio. 40

Figura 18 variazione di temperatura media mensile per la cella R3C4 relativa alle emissioni di MIL 3 e 50% MIL07 per il mese di Agosto. 40

Indice tabelle

Tabella 1 14
Tabella 2 Valori di riferimento la dissipazione di calore dai datacenter. 22
Tabella 3 elaborazione del parametro Classi di Stabilità elaborate da CALMET estratte in corrispondenza del DC. 25
Tabella 4 elaborazione del parametro Altezza dello strato di mescolamento elaborate da CALMET estratte in corrispondenza del DC. 26
Tabella 5 elaborazione del parametro velocità del vento elaborate da CALMET estratte in corrispondenza del DC. 26
Tabella 6 elaborazione del parametro pressione atmosferica elaborate da CALMET estratte in corrispondenza del DC. 26
Tabella 7 elaborazione del parametro umidità relativa elaborate da CALMET estratte in corrispondenza del DC. 27
Tabella 8 elaborazione del parametro temperatura dell'aria elaborate da CALMET estratte in corrispondenza del DC. 27
Tabella 9 classificazione delle celle del primo livello del dominio. 31
Tabella 10 potenze inserite in ogni cella del primo livello del dominio. 31

Disclaimer

With this document, Alvea srl has fulfilled the commission entrusted to it by L22 with the required diligence.

The calculations and results illustrated in this document have been obtained in compliance with current regulations and recognised rules in the sector of operation and are based on the state of knowledge at the time of writing the report.

In this regard, Alvea srl has prepared this documentation in accordance with the information and specifications provided by the Client, who therefore assumes all responsibility for the accuracy and correctness of the same.

To this end, Alvea srlconsiders that:

- the client, or third parties designated by them, have provided all the correct information and complete documents for the execution of the commission.
- this document will not be used in a partial manner.
- the processing and results contained in this document will not be used for any purpose other than that agreed upon or for any other purpose, nor will they be transposed to modified circumstances without being re-examined.
- in this document, the term "Client" refers to the company "L22" which has commissioned "Alvea" to draft this document.

Con il presente documento, Alvea srl ha eseguito l'incarico affidatole da L22 con la dovuta diligenza.

I calcoli e i risultati illustrati nel presente documento sono stati ottenuti nel rispetto delle normative vigenti e delle regole riconosciute nel settore di attività e si basano sullo stato delle conoscenze al momento della stesura del rapporto.

A tal proposito, Alvea srl ha redatto la presente documentazione in conformità alle informazioni e alle specifiche fornite dal Cliente, che pertanto si assume ogni responsabilità in merito all'accuratezza e alla correttezza della stessa.

A tal fine, Alvea srl considera che:

- il Cliente, o terzi da lui designati, abbiano fornito tutte le informazioni corrette e la documentazione completa per l'esecuzione dell'incarico.
- il presente documento non verrà utilizzato in modo parziale.
- le elaborazioni e i risultati contenuti nel presente documento non verranno utilizzati per scopi diversi da quelli concordati o per qualsiasi altro scopo, né verranno trasposti a circostanze modificate senza essere riesaminati.
- nel presente documento, il termine "Cliente" si riferisce alla società "L22" che ha incaricato "Alvea" di redigere il presente documento.

1 INTRODUZIONE

La crescente diffusione di infrastrutture caratterizzate da elevate dissipazioni termiche, quali data center, impianti industriali, centrali energetiche, sistemi di climatizzazione e altre sorgenti antropiche di calore, rende sempre più importante la valutazione degli effetti che tali emissioni possono produrre sul microclima locale. L'energia termica rilasciata nell'atmosfera può infatti determinare modificazioni, generalmente di entità limitata ma localmente significative, dei campi di temperatura e, indirettamente, delle condizioni igrometriche dell'aria, con possibili ripercussioni sul comfort ambientale, sui processi di dispersione atmosferica e, più in generale, sulle caratteristiche del microclima circostante.

Nell'ambito degli studi ambientali e delle procedure di Valutazione di Impatto Ambientale (VIA), la stima delle alterazioni microclimatiche costituisce un elemento di crescente interesse, soprattutto per opere caratterizzate da consistenti emissioni di calore sensibile. In tali contesti risulta spesso necessario disporre di strumenti di calcolo che consentano di effettuare valutazioni preliminari dell'entità delle variazioni termoigrometriche indotte dalle sorgenti emissive, mantenendo un adeguato equilibrio tra rappresentazione fisica del fenomeno, semplicità di utilizzo e rapidità di elaborazione.

Per una analisi di screening risulta frequentemente conveniente adottare approcci semplificati, basati sull'applicazione dei principi fondamentali della conservazione della massa e dell'energia ad opportuni volumi di controllo. Tra questi, i "Box Models" rappresentano una metodologia consolidata nella modellistica ambientale, nell'approccio di ricerca scientifica e costituiscono uno strumento ampiamente utilizzato per descrivere, con un limitato numero di ipotesi semplificative, l'evoluzione delle proprietà fisiche dell'atmosfera all'interno di un dominio di calcolo discretizzato.

Per questa applicazione si è utilizzato un modello a box che implementa tale approccio mediante un'applicazione sviluppata in linguaggio Python, progettata per stimare le variazioni di temperatura e di umidità relativa prodotte dall'immissione in atmosfera di potenze termiche associate a una o più sorgenti emissive. In questo modo si è in grado di rappresentare un dominio spaziale costituito da una griglia regolare di celle, nella quale ciascuna cella può essere caratterizzata da una emissione termica nulla o positiva definita.

Nel caso applicativo attualmente previsto, il dominio orizzontale è rappresentato da una griglia 5 x 5 con passo spaziale pari a 400 m in entrambe le direzioni. Ogni cella rappresenta un volume di controllo orizzontale sul quale vengono applicati i dati meteorologici di base elaborati in prima analisi con il codice CALMET opportunamente configurato, mentre la potenza termica viene assegnata cella per cella se presente. Tale impostazione consente di rappresentare configurazioni impiantistiche distribuite, nelle quali più porzioni del dominio di calcolo possono contribuire alla dissipazione complessiva di calore.

Il programma utilizza dati meteorologici orari e profili verticali dell'atmosfera derivanti da elaborazioni meteorologiche sviluppate appositamente con il codice CALMET. In particolare, vengono impiegati direttamente i parametri meteorologici disponibili al livello di riferimento a 10 m, quali temperatura dell'aria, umidità relativa, pressione atmosferica, velocità del vento, classe di stabilità atmosferica di Pasquill-Gifford e altezza dello strato di rimescolamento (Mixing Height), oltre ai corrispondenti profili verticali di temperatura, pressione, umidità e vento. Tali dati sono assunti come condizioni meteorologiche di base valide per ogni cella del dominio di calcolo.

L'obiettivo dell'attività è quello di fornire una elaborazione capace di stimare in modo fisicamente coerente l'ordine di grandezza delle alterazioni termoigrometriche prodotte da sorgenti di calore distribuite su un dominio locale. L'intero algoritmo è basato su relazioni fisiche consolidate nella letteratura tecnico-scientifica e utilizza parametri meteorologici direttamente disponibili nei dati di input, riducendo al minimo il ricorso a coefficienti empirici o parametrizzazioni non controllabili dall'utente. Tutti i parametri caratteristici del calcolo, quali la potenza termica delle singole celle, le dimensioni della griglia, la quota prevalente di emissione, le dimensioni dei volumi di controllo e i percorsi dei file di input e output, sono definiti e opportunamente configurati.

Il modello a box è stato quindi applicato al caso specifico dello scenario di emissioni di calore, determinate dall'esercizio del nuovo Data Center Stack Campus di Siziano. L'analisi è relativa alla valutazione degli effetti microclimatici cumulativi associati alla concentrazione di Data Center nella macro area e valuta i possibili effetti sulla stabilità atmosferica locale, sulla formazione di microclimi locali e sulle condizioni di dispersione degli inquinanti. Tale approfondimento risulta necessario in considerazione della presenza di più infrastrutture energeticamente intensive distribuite entro pochi chilometri dal sito in progetto e della possibile interazione tra i rispettivi carichi termici.

1.1 Review tecnica di settore

La letteratura tecnico-scientifica disponibile sul tema dell'impatto microclimatico dei data center evidenzia che tali infrastrutture possono costituire sorgenti localizzate di calore antropogenico, in quanto una quota rilevante, e di fatto prevalente, dell'energia elettrica assorbita dai server, dagli apparati IT e dai sistemi ausiliari viene trasformata in calore che deve essere successivamente rimosso e rigettato all'ambiente esterno mediante i sistemi di raffreddamento. Tale aspetto è richiamato anche nella documentazione tecnica sul recupero del calore dei data center, nella quale viene evidenziato come il calore generato dai server e dalle apparecchiature sia spesso dissipato verso l'atmosfera quando non intercettato da sistemi di recupero energetico o riutilizzo termico (EPRI, 2024; EUDCA, 2024). In tale quadro, il data center deve essere considerato non solo come utenza energetica, ma anche come sorgente termica puntuale o areale, potenzialmente in grado di modificare, su scala locale, le condizioni termoigrometriche e dispersive dell'ambiente circostante.

Studi recenti condotti su data center in esercizio indicano che il calore dissipato può determinare incrementi misurabili della temperatura dell'aria nelle aree circostanti. In particolare, Sailor et al. (2026), sulla base di misure in campo effettuate in prossimità di quattro data center, riportano incrementi della temperatura dell'aria fino a circa 2,2 °C, con valori medi dell'ordine di 0,7–0,9 °C e un'estensione spaziale degli effetti superiore a 250 m. Tale studio è particolarmente rilevante poiché riguarda direttamente la temperatura dell'aria a scala di quartiere, distinguendosi da approcci basati esclusivamente su indicatori superficiali o satellitari. Ulteriori evidenze sono fornite da Marinoni et al. (2026), che introducono il concetto di "*data heat island effect*" attraverso l'analisi della temperatura superficiale terrestre da telerilevamento in prossimità di data center AI hyperscale. Gli autori stimano un incremento medio della Land Surface Temperature dell'ordine di 2 °C dopo l'avvio dell'esercizio dei data center analizzati. Tale risultato, pur riferendosi alla temperatura superficiale e non direttamente alla temperatura dell'aria a 2 m, conferma la possibilità che grandi infrastrutture di calcolo producano un segnale termico locale rilevabile e persistente.

I valori riportati in letteratura non devono essere interpretati come direttamente trasferibili a ogni sito, poiché l'entità dell'impatto dipende dalla potenza termica effettivamente dissipata, dalla tipologia dei sistemi di raffreddamento, dalla quota e modalità di rilascio, dalla configurazione degli edifici, dalla presenza di ricircoli locali e dalle condizioni meteorologiche, in particolare direzione e velocità del vento, stabilità atmosferica e altezza di rimescolamento. Tuttavia, essi forniscono un ordine di grandezza utile per inquadrare il potenziale effetto microclimatico di un data center di nuova realizzazione. In questo senso, incrementi medi locali dell'aria dell'ordine di 0,7–0,9 °C e incrementi massimi puntuali fino a circa 2,2 °C, come riportato da Sailor et al. (2026), possono essere assunti come riferimento bibliografico preliminare per il confronto con i risultati di una valutazione modellistica sito-specifica. Analogamente, l'incremento medio della temperatura superficiale di circa 2 °C stimato da Marinoni et al. (2026) rappresenta un ulteriore elemento di confronto, da utilizzare tuttavia con cautela in quanto relativo alla Land Surface Temperature e non direttamente alla temperatura dell'aria.

Per quanto riguarda l'umidità relativa, la letteratura disponibile risulta meno ricca di risultati quantitativi direttamente riferiti ai data center. In termini fisici, nel caso di sistemi che rigettano prevalentemente calore sensibile, l'aumento locale della temperatura dell'aria tende a determinare una riduzione dell'umidità relativa, a parità di contenuto assoluto di vapore acqueo. Pertanto, in assenza di torri evaporative, raffrescatori adiabatici o altri sistemi con rilascio significativo di vapore o aerosol d'acqua, l'effetto atteso non è un incremento della UR, ma una sua diminuzione locale nelle zone interessate dal plume termico. Tale riduzione può essere stimata mediante relazioni psicrometriche, associando gli incrementi di temperatura calcolati dal modello alla condizione termoigrometrica ante operam. Nel caso invece di sistemi evaporativi o ibridi, la valutazione deve considerare anche il contributo latente, poiché il plume può essere caratterizzato non solo da incremento termico, ma anche da variazione del contenuto di vapore. Per una valutazione sito-specifica risulta quindi opportuno modellare separatamente il contributo di calore sensibile e, ove presente, il contributo di calore latente, analizzando le variazioni di temperatura e umidità relativa su base oraria e stagionale, con particolare attenzione agli scenari meteorologici caratterizzati da bassa ventilazione, stabilità atmosferica e ridotta altezza di rimescolamento.

2 PRINCIPI TEORICI DEI MODELLI A BOX

2.1 Generalità

I modelli a box (Box Models) costituiscono una classe di modelli matematici semplificati utilizzati per descrivere l'evoluzione temporale e spaziale delle proprietà fisiche o chimiche di un sistema mediante l'applicazione delle leggi di conservazione all'interno di uno o più volumi di controllo. L'approccio trae origine dalla meccanica dei fluidi e dalla termodinamica dei sistemi aperti, nelle quali il dominio di studio viene suddiviso in opportuni volumi elementari all'interno dei quali le variabili di stato vengono considerate uniformemente distribuite.

L'ipotesi fondamentale consiste nel ritenere che, all'interno di ciascun volume di controllo, il rimescolamento turbolento sia sufficientemente rapido da rendere trascurabili i gradienti interni delle grandezze considerate alla scala del box. Questa semplificazione consente di trasformare un problema governato da equazioni differenziali alle derivate parziali in un sistema di equazioni algebriche o differenziali ordinarie, riducendo significativamente l'onere computazionale rispetto ai modelli tridimensionali di fluidodinamica computazionale.

Nella modellistica atmosferica i Box Models trovano applicazione in numerosi ambiti, tra cui la valutazione preliminare della qualità dell'aria, la stima dell'evoluzione di contaminanti atmosferici, la valutazione delle isole di calore urbane, le analisi energetiche, gli studi microclimatici e la valutazione degli effetti di sorgenti termiche antropiche. Pur rappresentando un'approssimazione della reale complessità dei processi atmosferici, tali modelli consentono di ottenere risultati fisicamente consistenti qualora vengano rispettate le ipotesi di validità sulle quali essi si basano.

2.2 Conservazione della massa

L'applicazione del principio di conservazione della massa costituisce uno dei fondamenti teorici del modello. Per un volume di controllo fisso la variazione della massa d'aria nel tempo può essere espressa come differenza tra la portata massica entrante e la portata massica uscente.

Poiché il modello considera condizioni quasi stazionarie nell'intervallo temporale di elaborazione oraria, si assume che la massa d'aria contenuta in ciascun volume di controllo non subisca variazioni significative nel corso del singolo passo temporale. Ne consegue che, per ciascun intervallo, la portata massica entrante e quella uscente risultano bilanciate ai fini del calcolo energetico medio.

La massa d'aria associata a ciascun volume di controllo viene determinata mediante la densità dell'aria umida e il volume del box. Nella versione attuale del software tale densità non viene assunta costante, ma è calcolata a partire dai dati meteorologici disponibili nei profili verticali, tenendo conto della variazione con la quota di temperatura, pressione e contenuto di vapore acqueo.

$$m_i = rho_i \cdot V_i$$

dove m_i è la massa d'aria del volume di controllo i, rho_i è la densità dell'aria umida e V_i è il volume del corrispondente box atmosferico.

2.3 Conservazione dell'energia

Il principio di conservazione dell'energia rappresenta il nucleo dell'algoritmo di calcolo. La sorgente termica introduce nel dominio una potenza P, espressa in Watt, che viene trasferita all'aria determinando un incremento della sua energia interna e quindi della temperatura.

In una formulazione elementare, trascurando gli scambi radiativi e assumendo che l'energia immessa venga completamente trasferita all'aria, il bilancio energetico di un volume di controllo puo essere espresso in funzione della portata massica d'aria, del calore specifico e dell'incremento di temperatura. Tale relazione costituisce il punto di partenza teorico del software.

$$P = m_dot \cdot c_p \cdot DeltaT$$

$$DeltaT = P / (m_dot \cdot c_p)$$

Nella versione V5 del programma, tuttavia, il calcolo non viene limitato al solo volume contenente la sorgente, ma viene esteso all'intera griglia spaziale e alla corrispondente colonna atmosferica verticale. Ogni cella della griglia può ricevere energia direttamente, se caratterizzata da una potenza positiva, oppure indirettamente, per effetto del trasferimento orizzontale proveniente dalle celle emissive vicine.

La procedura è sviluppata imponendo il rispetto del principio di conservazione dell'energia. Per ogni intervallo temporale e per ogni cella sorgente, l'energia introdotta viene redistribuita tra la cella emissiva e le celle circostanti secondo la parametrizzazione spaziale adottata; successivamente, in ciascuna cella ricevente, l'energia viene distribuita lungo il profilo verticale utilizzando le proprietà termo-fisiche locali dell'aria.

$$P_s \cdot Delta\ t = sum_j\ sum_i\ m_(i,j) \cdot c_(p,i,j) \cdot DeltaT_(i,j,s)$$

Nella relazione precedente P_s rappresenta la potenza della sorgente s, j indica la cella della griglia che riceve una quota dell'energia, i rappresenta il livello verticale, m_(i,j) è la massa d'aria del livello i nella cella j, c_(p,i,j) è il calore specifico dell'aria umida e DeltaT_(i,j,s) è il contributo di incremento termico dovuto alla sorgente s.

Nel caso di più celle emissive, gli incrementi di temperatura associati alle singole sorgenti vengono sommati per sovrapposizione lineare. Tale assunzione è coerente con l'impostazione semplificata del modello e risulta adeguata per valutazioni preliminari degli effetti medi sulle condizioni termoigrometriche locali.

2.4 Propagazione verticale dell'effetto termico

L'energia termica immessa dalla sorgente non rimane confinata nel volume elementare contenente la sorgente stessa, ma viene progressivamente redistribuita lungo la colonna atmosferica per effetto dei processi di rimescolamento verticale. Nel software tale redistribuzione viene effettuata utilizzando direttamente i parametri meteorologici disponibili per ciascun intervallo temporale, senza ricorrere a profili verticali climatologici o a coefficienti di attenuazione prefissati.

Il parametro principale che governa la distribuzione verticale dell'energia è rappresentato dall'altezza dello strato di rimescolamento (Mixing Height), acquisita direttamente dai dati meteorologici di input. Tale

grandezza identifica lo spessore dello strato limite atmosferico entro il quale i moti turbolenti risultano sufficientemente intensi da favorire il trasferimento verticale del calore.

La versione più recente del software tiene inoltre conto della quota prevalente di emissione. Nel caso di sorgenti installate su copertura, quali sistemi di raffreddamento collocati sul tetto di edifici industriali o data center, il rilascio termico non viene riferito al livello più basso del dominio, ma ad una quota configurabile dall'utente. La distribuzione verticale del calore viene pertanto centrata intorno alla quota reale di emissione, con uno spessore emissivo definito nel file dei parametri.

Tale impostazione consente di evitare una concentrazione artificiale dell'incremento termico nei primi livelli prossimi al suolo, rendendo più realistica la forma del profilo verticale di DeltaT per sorgenti elevate. Il calore viene comunque redistribuito lungo la colonna atmosferica in funzione del Mixing Height, della stabilità atmosferica e delle caratteristiche termo-fisiche dei singoli livelli verticali.

2.5 Propagazione orizzontale su griglia di calcolo

La versione V5 del software introduce una rappresentazione spaziale del dominio mediante una griglia regolare di celle quadrate. Nel caso applicativo di riferimento la griglia è costituita da 5 righe e 5 colonne, con passo spaziale pari a 400 m sia lungo la direzione x sia lungo la direzione y. Il dominio complessivo rappresentato ha quindi estensione pari a 2000 m x 2000 m.

Ciascuna cella della griglia può essere associata a una potenza termica nulla o positiva. Le celle con potenza nulla non costituiscono sorgenti dirette, ma possono comunque ricevere una quota di energia termica proveniente dalle celle emissive adiacenti o poste sopravento, in funzione della direzione del vento, della distanza e delle condizioni di rimescolamento atmosferico.

Il trasferimento laterale dell'energia viene parametrizzato mediante una diffusività orizzontale turbolenta, calcolata a partire dalla velocità del vento, dal Mixing Height e da un coefficiente dipendente dalla classe di stabilità atmosferica. La formulazione non introduce una frazione laterale fissa, ma determina ora per ora la quota di energia che può essere trasferita alle celle circostanti in funzione delle condizioni meteorologiche.

$$K_h = beta_PGT \cdot U_eff \cdot H_mix$$

$$Pe = U_eff \cdot L / K_h$$

$$f_lat = 1 / (1 + Pe)$$

Il numero di Peclet consente di esprimere il rapporto tra trasporto advettivo e rimescolamento turbolento. Valori ridotti di Pe indicano condizioni favorevoli alla diffusione laterale, mentre valori elevati rappresentano condizioni nelle quali il trasporto è maggiormente direzionato dal vento. La distanza tra celle è considerata attraverso una funzione di attenuazione spaziale, nella quale la lunghezza caratteristica laterale non può scendere al di sotto di una soglia minima configurabile, pari al passo griglia nel caso di riferimento.

$$L_d = max(beta_PGT \cdot H_mix, L_min)$$

La ripartizione tra le celle riceventi viene inoltre orientata in funzione della direzione del vento. Le celle sottovento ricevono un peso maggiore, mentre le celle laterali o sopravento ricevono quote inferiori, coerentemente con il comportamento atteso del trasporto atmosferico a scala locale. In presenza di più

sorgenti, il contributo spaziale di ciascuna sorgente viene calcolato separatamente e successivamente sommato nelle celle riceventi.

2.6 Influenza della stabilita atmosferica

La dispersione verticale e orizzontale dell'energia termica è influenzata dalla stabilità atmosferica, descritta nel software mediante le classi di Pasquill-Gifford presenti nei dati meteorologici di input.

Le classi di stabilità non vengono utilizzate per sostituire il valore osservato del Mixing Height, ma costituiscono un'informazione meteorologica di supporto per modulare l'efficienza del rimescolamento turbolento. In condizioni instabili prevalgono moti convettivi più intensi, che favoriscono una maggiore redistribuzione dell'energia nello strato limite. Viceversa, durante condizioni stabili, la turbolenza risulta ridotta e il calore tende a rimanere maggiormente confinato nelle porzioni di atmosfera prossime alla quota di emissione.

Nel software tali informazioni sono utilizzate sia nella parametrizzazione verticale sia nella stima della diffusività orizzontale, mantenendo tuttavia i dati meteorologici orari come riferimento principale del calcolo. Questa impostazione consente di rappresentare la variabilità reale delle condizioni atmosferiche senza introdurre classificazioni rigide o valori tabellari sostitutivi del dato meteorologico disponibile.

3 DESCRIZIONE DEL MODELLO A BOX

In questo capitolo vengono illustrati i principi teorici sui quali si basa l'approccio adottato, le equazioni implementate nel software, la struttura dell'algoritmo di calcolo, le modalità di gestione dei dati meteorologici e la descrizione degli input e degli output prodotti dal programma.

3.1 Generalità

Il software è stato sviluppato in linguaggio Python con l'obiettivo di automatizzare il calcolo delle alterazioni termoigrometriche indotte da sorgenti di calore in atmosfera mediante l'applicazione di un modello a volumi di controllo. L'utilizzo del linguaggio Python consente di sviluppare procedure di calcolo facilmente modificabili, trasparenti e riproducibili, garantendo al tempo stesso buone prestazioni nell'elaborazione di lunghe serie temporali meteorologiche e di profili verticali dell'atmosfera.

La versione V5 del programma estende l'impostazione originaria a una griglia spaziale 5 x 5. Ogni cella della griglia viene identificata mediante una codifica del tipo Rn_Cm, dove R indica la riga e C la colonna. La riga 1 corrisponde alla parte superiore della griglia, mentre la colonna 1 corrisponde al lato sinistro. La cella centrale della griglia 5 x 5 è pertanto R3_C3.

L'intero algoritmo è stato progettato seguendo una struttura modulare nella quale le fasi di acquisizione dei dati, elaborazione numerica, redistribuzione spaziale e verticale dell'energia ed esportazione dei risultati risultano logicamente separate. Tale organizzazione consente una semplice manutenzione del codice e facilita eventuali futuri aggiornamenti del programma.

3.2 Struttura generale del programma

L'elaborazione viene eseguita secondo una sequenza di operazioni prefissata. In una prima fase il programma acquisisce i parametri generali contenuti nel file di configurazione esterno. Successivamente vengono letti i dati meteorologici orari al suolo e i corrispondenti profili verticali dell'atmosfera.

Il programma costruisce quindi la griglia spaziale, legge la potenza termica assegnata a ciascuna cella e identifica le celle emissive, cioè quelle caratterizzate da potenza positiva. Per ciascun intervallo temporale vengono calcolate le proprietà termoigrometriche dell'aria, la quota di energia rilasciata da ciascuna sorgente, la relativa redistribuzione orizzontale tra le celle e la successiva distribuzione verticale lungo i profili atmosferici. Terminata la fase di calcolo, il software genera automaticamente i file di output contenenti i dati meteorologici originali, i valori aggiornati e le grandezze di controllo numerico. L'elaborazione non richiede l'intervento dell'operatore durante il calcolo, una volta definiti correttamente i file di input e il file dei parametri.

- lettura dei parametri del modello;
- acquisizione dei dati meteorologici al suolo;
- acquisizione dei profili verticali;
- costruzione della griglia spaziale;
- lettura delle potenze assegnate alle celle;

- calcolo delle proprietà termoigrometriche;
- redistribuzione orizzontale e verticale dell'energia;
- aggiornamento di temperatura e umidità relativa;
- esportazione dei risultati e dei file di controllo.

3.3 File di configurazione

Per rendere il programma adattabile a differenti scenari di simulazione, tutti i principali parametri numerici sono contenuti in un file di configurazione esterno. Questa soluzione consente di modificare rapidamente le condizioni della simulazione senza intervenire direttamente sul codice sorgente. Nella versione V5 il file di configurazione contiene, oltre ai parametri generali del modello, anche la definizione della griglia spaziale e della potenza termica assegnata a ciascuna cella. Le celle prive di emissione vengono impostate con potenza pari a zero, mentre le celle emissive sono identificate da valori di potenza maggiori di zero. Tra i principali parametri configurabili rientrano la dimensione della griglia, il passo spaziale, la quota prevalente di emissione, lo spessore verticale della fascia emissiva, la velocità minima del vento, le soglie di rimescolamento laterale, i percorsi dei file di input e di output e le potenze termiche delle singole celle.

Tabella 1

Parametro	Significato	Esempio
GRID_N	numero di celle per lato della griglia	5
GRID_STEP_M	passo spaziale della griglia	400
QUOTA_SORGENTE_CALORE_M	quota prevalente di emissione termica	20
POTENZA_R3_C3_W	potenza assegnata alla cella R3_C3	>0 oppure 0
LATERAL_LD_MIN_M	lunghezza minima di decadimento laterale	400

3.4 Acquisizione dei dati meteorologici

Il programma utilizza due insiemi di dati meteorologici. Il primo contiene i parametri disponibili al livello di riferimento a 10 m dal suolo, mentre il secondo descrive l'evoluzione verticale dell'atmosfera mediante una serie di livelli di calcolo. Entrambi i file vengono letti automaticamente all'avvio dell'elaborazione.

I dati meteorologici al suolo e i profili verticali sono assunti come condizioni meteorologiche di base valide per tutte le celle della griglia. Tale ipotesi è coerente con la scala locale del dominio considerato e consente di attribuire le differenze spaziali dei risultati esclusivamente alla diversa distribuzione delle sorgenti e al trasferimento laterale dell'energia, mantenendo invariato il quadro meteorologico di riferimento.

Per ogni intervallo temporale vengono acquisiti i principali parametri necessari ai calcoli, tra cui temperatura dell'aria, pressione atmosferica, umidità relativa, velocità e direzione del vento, classe di stabilità atmosferica di Pasquill-Gifford e altezza dello strato di rimescolamento. L'utilizzo di dati orari consente di rappresentare l'effettiva variabilità delle condizioni atmosferiche durante l'intero periodo di simulazione.

3.5 Gestione dei profili verticali e della griglia spaziale

Il file dei profili verticali contiene, per ciascuna ora, una serie di livelli atmosferici caratterizzati da quota, temperatura, pressione, umidità relativa, velocità del vento e direzione del vento. Durante l'elaborazione il software associa automaticamente ogni profilo verticale all'ora meteorologica corrispondente.

La stessa struttura verticale viene utilizzata come base per tutte le celle della griglia. In questo modo ogni cella dispone del medesimo profilo meteorologico ante operam, sul quale vengono successivamente applicati gli incrementi di temperatura e le variazioni di umidità relativa derivanti dal contributo delle sorgenti termiche presenti nel dominio. La griglia spaziale viene generata automaticamente a partire dal numero di celle e dal passo spaziale definiti nel file dei parametri. La posizione relativa delle celle consente al software di calcolare le distanze tra le celle emissive e le celle riceventi, nonché l'allineamento rispetto alla direzione del vento. Tali informazioni sono utilizzate per determinare la ripartizione orizzontale dell'energia.

3.6 Calcoli termoigrometrici e produzione degli output

Prima dell'esecuzione del bilancio energetico il software determina, per ciascun livello atmosferico, le principali proprietà termodinamiche dell'aria utilizzando i dati meteorologici disponibili nei profili verticali. La densità dell'aria viene calcolata mediante l'equazione di stato dei gas, tenendo conto della temperatura, della pressione atmosferica e del contenuto di umidità presenti ad ogni quota. Contestualmente viene calcolato il calore specifico dell'aria umida, utilizzato nella successiva fase di bilancio energetico. Per ogni intervallo temporale e per ciascuna cella emissiva, il programma calcola l'energia termica associata alla potenza definita nel file dei parametri. Tale energia viene dapprima redistribuita orizzontalmente sulla griglia in funzione della distanza, della direzione del vento e delle condizioni di rimescolamento atmosferico; successivamente, per ogni cella ricevente, viene distribuita lungo il profilo verticale tenendo conto della quota di emissione e delle proprietà termo-fisiche dei livelli atmosferici.

L'incremento di temperatura di ciascuna cella e di ciascun livello verticale è ottenuto dal rapporto tra l'energia attribuita al volume di controllo e la capacità termica della massa d'aria contenuta nello stesso volume. In presenza di più sorgenti, i contributi vengono sommati al fine di ottenere il valore complessivo di variazione termica. L'aggiornamento dell'umidità relativa viene effettuato assumendo che le sorgenti termiche considerate non introducano vapore acqueo aggiuntivo nell'atmosfera. Di conseguenza, il contenuto assoluto di vapore viene mantenuto costante, mentre la pressione di saturazione viene ricalcolata alla nuova temperatura. La variazione di umidità relativa deriva pertanto dalla modifica della capacità dell'aria di contenere vapore acqueo a seguito del riscaldamento. Al termine dell'elaborazione il programma esporta automaticamente i risultati in formato CSV ed eventualmente Excel. I file prodotti riportano, per ciascun intervallo temporale, per ciascuna cella della griglia e per ciascun livello atmosferico considerato, i principali parametri meteorologici originali e quelli aggiornati a seguito dell'applicazione del modello di calcolo. Vengono inoltre prodotti file di sintesi mensile e file di controllo destinati alla verifica della correttezza numerica delle elaborazioni e del rispetto del bilancio energetico complessivo. L'organizzazione degli output consente una successiva elaborazione mediante fogli elettronici, software GIS o applicativi di post-processing dedicati alla modellistica ambientale. La presenza dell'identificativo della cella consente inoltre di ricostruire agevolmente la distribuzione spaziale delle variazioni di temperatura e umidità relativa sul dominio di calcolo.

4 APPROFONDIMENTI

La configurazione utilizzata per questa applicazione comprende la possibilità di rappresentare un dominio orizzontale discretizzato in più celle, ciascuna delle quali può essere caratterizzata da una propria potenza termica. L'obiettivo non e quello di trasformare il software in un modello fluidodinamico tridimensionale, ma di consentire una valutazione spazialmente distribuita degli effetti termoigrometrici indotti da configurazioni impiantistiche articolate su più porzioni del dominio. La logica adottata rimane coerente con l'impostazione a volumi di controllo. Ciascuna cella della griglia e trattata come un volume atmosferico di base, al quale vengono associate le medesime condizioni meteorologiche ante operam e un eventuale contributo energetico diretto o indiretto. Il contributo diretto deriva dalla potenza inserita nel file dei parametri per la cella considerata, mentre il contributo indiretto deriva dalla redistribuzione laterale dell'energia rilasciata dalle celle emissive presenti nella griglia. In questa impostazione il risultato calcolato per una cella non dipende esclusivamente dalla presenza di una sorgente interna alla cella stessa, ma anche dalla posizione relativa rispetto alle altre celle emissive, dalla direzione del vento, dalla distanza e dalle condizioni di rimescolamento atmosferico dell'ora considerata. Ne deriva una descrizione più coerente degli effetti cumulativi in configurazioni nelle quali più sistemi di raffreddamento o più aree impiantistiche contribuiscono simultaneamente alla dissipazione del calore in atmosfera.

4.1 Definizione della griglia 5 x 5

Il dominio spaziale viene rappresentato mediante una matrice regolare di celle identificate dal codice Rn_Cm. La lettera R indica la riga, mentre la lettera C indica la colonna. La numerazione delle righe procede dall'alto verso il basso, mentre la numerazione delle colonne procede da sinistra verso destra. Nel caso di griglia 5 x 5 la cella centrale e R3_C3. Il passo spaziale e assunto pari a 400 m lungo entrambe le direzioni. La griglia copre quindi un'estensione complessiva pari a 2000 m x 2000 m. Ogni cella rappresenta un'area di 400 m x 400 m, sulla quale viene applicato il bilancio energetico medio e sulla quale vengono stimati i nuovi valori di temperatura e umidita relativa a partire dai dati meteorologici di base. La scelta di utilizzare una griglia regolare consente di mantenere una struttura semplice e facilmente verificabile. Essa rende inoltre immediata la rappresentazione dei risultati in ambiente GIS o in un foglio elettronico, poiché ogni cella e associabile a una posizione relativa nota rispetto al centro del dominio o rispetto ad un eventuale sistema di coordinate esterno definito dall'utente.

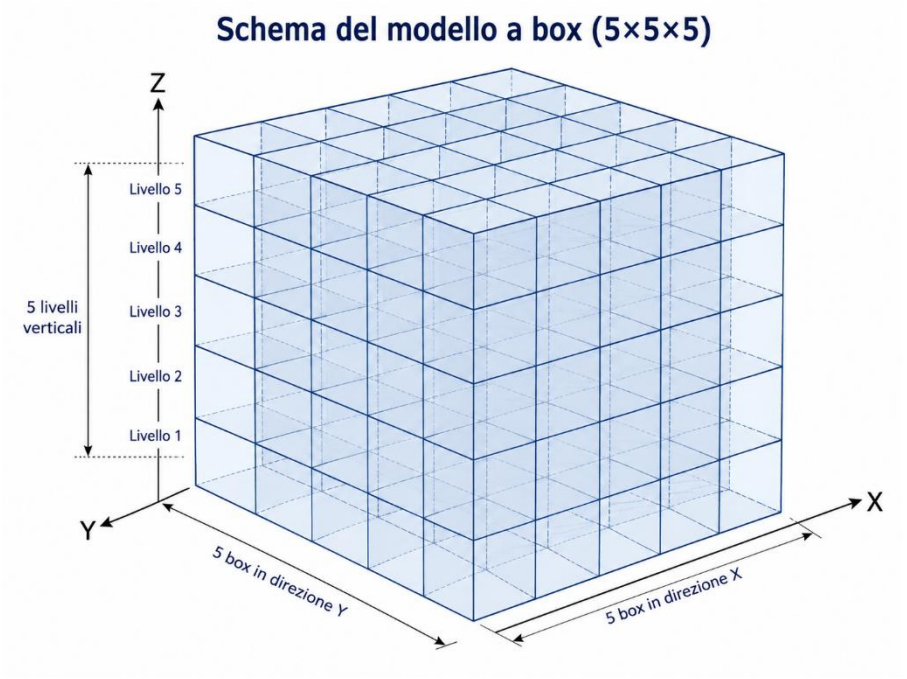

Figura 1 rappresentazione schematica della griglia del modello a box.

4.2 Assegnazione delle potenze alle celle

La potenza termica viene assegnata direttamente per ciascuna cella della griglia e previsto un parametro di potenza espresso in Watt. Le celle con potenza pari a zero vengono considerate prive di emissione diretta, mentre le celle con potenza maggiore di zero vengono trattate come sorgenti termiche.

Questa impostazione consente di rappresentare configurazioni impiantistiche anche non simmetriche. Ad esempio, e possibile impostare potenza positiva solo su alcune celle, mantenendo le restanti a zero. Il programma non richiede che le celle emissive siano contigue né che siano disposte secondo una geometria regolare; la posizione relativa viene ricavata automaticamente dalla codifica della griglia.

Nel calcolo orario, ogni cella sorgente viene elaborata separatamente. Il contributo termico della singola sorgente viene redistribuito sulla griglia e lungo la verticale; al termine della procedura, i contributi provenienti da tutte le sorgenti vengono sommati nelle celle riceventi. Tale procedura corrisponde a una sovrapposizione lineare dei contributi energetici, coerente con l'impostazione del modello e con l'obiettivo di valutare l'ordine di grandezza delle variazioni termoigrometriche medie.

4.3 Condizioni meteorologiche comuni alla griglia

I dati meteorologici di input, sia al livello di riferimento a 10 m sia nei profili verticali, vengono assunti come condizioni meteorologiche di base per ogni cella della griglia. In altri termini, il software acquisisce il campo meteorologico di CALMET, spazialmente variabile, all'interno del dominio 5 x 5, ed applica il profilo ante operam ad ogni cella del dominio.

Tale assunzione è coerente con la scala del problema affrontato e con la natura del modello. Le differenze spaziali nei risultati non derivano quindi da differenze meteorologiche iniziali tra le celle, ma esclusivamente dalla posizione delle sorgenti, dalla distribuzione laterale dell'energia e dalla successiva redistribuzione verticale.

La validità dell'ipotesi dipende dalla dimensione del dominio e dall'omogeneità meteorologica dell'area di studio. Per domini locali dell'ordine di pochi chilometri e in assenza di forti discontinuità orografiche o urbane, l'assunzione di un profilo meteorologico comune costituisce una semplificazione generalmente accettabile per valutazioni preliminari.

4.4 Redistribuzione laterale e ruolo del vento

La redistribuzione laterale dell'energia viene calcolata considerando la posizione relativa tra la cella sorgente e le celle riceventi. Per ogni coppia sorgente-ricevente viene determinata la distanza tra i centri delle celle e l'allineamento rispetto alla direzione del vento. Le celle collocate sottovento rispetto alla sorgente ricevono un peso maggiore, mentre le celle poste lateralmente o sopravento ricevono un contributo minore.

Il modello utilizza una lunghezza caratteristica laterale di decadimento che dipende dal Mixing Height e dalla classe di stabilita atmosferica, ma che non può essere inferiore ad un valore minimo configurabile. Tale scelta e stata introdotta per evitare una attenuazione laterale eccessivamente rapida nelle condizioni caratterizzate da bassi valori di Mixing Height o da stabilita atmosferica elevata. Nel caso di riferimento, la lunghezza minima e assunta pari al passo griglia, cioè 400 m.

L'introduzione di una lunghezza minima laterale non elimina il ruolo della stabilita atmosferica, ma impedisce che il trasferimento orizzontale venga annullato artificialmente già alla prima cella adiacente. In questo modo il modello mantiene un comportamento più coerente con la scala spaziale della griglia e con il fatto che il trasporto orizzontale del calore e influenzato non solo dal rimescolamento verticale, ma anche dall'advezione media associata al vento.

4.5 Quota di emissione e profilo verticale

In molte applicazioni, in particolare nel caso di data center o edifici industriali dotati di sistemi di raffreddamento in copertura, il rilascio del calore non avviene al livello del suolo, ma ad una quota superiore. Il modello a box applicato consente pertanto di specificare una quota prevalente di emissione e uno spessore verticale della fascia emissiva. La distribuzione verticale dell'energia viene centrata intorno alla quota di emissione impostata dall'utente. In tal modo il massimo incremento di temperatura tende a collocarsi in prossimità della quota alla quale il calore viene effettivamente rilasciato, evitando che l'intera anomalia termica venga attribuita al primo livello del profilo atmosferico. Questa impostazione risulta particolarmente importante quando i profili verticali includono livelli prossimi alla quota di copertura dell'edificio.

Il trasferimento verticale successivo e governato dal Mixing Height, dalla stabilita atmosferica e dalle proprietà termo-fisiche dei singoli livelli. La distribuzione ottenuta non rappresenta quindi un semplice decadimento geometrico con la quota, ma una ripartizione energetica vincolata dal bilancio complessivo e centrata sulla quota di rilascio reale della sorgente.

5 IPOTESI, LIMITI E CONTROLLI NUMERICI

5.1 Ipotesi principali

Il modello a box è basato su alcune ipotesi di base che devono essere considerate nell'interpretazione dei risultati. La prima riguarda l'omogeneità meteorologica del dominio: i dati meteorologici di base sono applicati a tutte le celle della griglia. La seconda riguarda la linearità della sovrapposizione dei contributi delle diverse sorgenti, che consente di sommare gli incrementi di temperatura prodotti dalle singole celle emissive. La terza riguarda la natura media del risultato, riferito al volume di controllo (cella di 400 metri coerente con quella impostata nella simulazione di CALMET) ed al passo temporale orario.

Il modello non risolve esplicitamente le equazioni di Navier-Stokes, non calcola il campo tridimensionale della turbolenza e non descrive in dettaglio gli effetti locali indotti dalla geometria degli edifici, dalle facciate, dagli ostacoli o dalla presenza di getti termici direzionati.

Il modello a box applicato fornisce uno strumento di calcolo trasparente, rapido e riproducibile per stimare l'ordine di grandezza delle variazioni di temperatura e umidita relativa indotte da sorgenti termiche distribuite su un dominio locale. In tale prospettiva il modello e particolarmente adatto a studi preliminari, analisi di screening, confronti tra scenari e supporto alle valutazioni ambientali.

5.2 Controllo energetico

La coerenza energetica costituisce uno degli elementi più importanti del modello. Per questo motivo il modello a box applicato produce specifici file di controllo nei quali viene verificata la corrispondenza tra l'energia immessa dalle sorgenti e l'energia redistribuita nei volumi di controllo. Tale controllo consente di identificare eventuali anomalie numeriche o errori nella parametrizzazione della griglia e rappresenta l'approccio alla verifica della correttezza dell'elaborazione.

Il controllo viene eseguito a livello temporale, considerando l'insieme delle sorgenti attive e la redistribuzione energetica sulle celle e sui livelli verticali. La presenza di errori energetici nulli o trascurabili indica che la procedura di ripartizione spaziale e verticale non introduce creazioni o perdite artificiali di energia. La verifica non sostituisce la validazione fisica del modello, ma rappresenta un requisito necessario per garantire la consistenza interna del calcolo.

5.3 Interpretazione dei risultati

I risultati prodotti dal modello a box devono essere interpretati come variazioni medie riferite ai volumi di controllo della griglia e ai livelli verticali disponibili nei profili meteorologici. Il valore di incremento di temperatura attribuito ad una cella non rappresenta necessariamente il massimo puntuale che potrebbe verificarsi in prossimità di una macchina o di un camino di espulsione, ma la variazione media associata al volume atmosferico considerato, ovvero la cella di calcolo di 400 metri di lato.

Analogamente, la variazione di umidita relativa e conseguenza del riscaldamento dell'aria in assenza di apporto aggiuntivo di vapore. Essa va pertanto letta come effetto termoigrometrico indiretto: a parità di

contenuto di vapore, l'aumento della temperatura determina un incremento della pressione di saturazione e quindi una riduzione dell'umidita relativa.

Nel confronto tra celle differenti e opportuno considerare la posizione delle sorgenti, la direzione prevalente del vento nelle ore analizzate e il valore del Mixing Height. Celle vicine ad aree emissive o collocate sottovento possono mostrare incrementi maggiori rispetto a celle poste sopravento o più distanti. La valutazione mensile consente di sintetizzare tali effetti lungo periodi più lunghi, riducendo l'influenza delle singole ore meteorologicamente estreme.

6 CASO DI STUDIO

Lo studio è relativo alle emissioni di calore determinate dall'esercizio del Data Center Stack Campus da realizzarsi su alcuni lotti a nord e a sud della SP40 in Comune di Siziano (PV) e localizzato a NORD – NORD EST dell'abitato urbano di Siziano. Nella seguente figura l'inquadramento dell'area di interesse.

Figura 2 localizzazione dei datacenter oggetto dello studio.

6.1 Rilascio di calore

Nella seguente tabella si mostrano i dati di progetto relativi alla dissipazione di calore dall'esercizio dei datacenter. Per lo studio sono stati considerati i valori "MAX TEORICO" basati sui valori nominali degli impianti installati, corrispondenti ai valori massimi possibili. Il valore più attendibile è invece quello che considera le ore di free cooling.

Tabella 2 Valori di riferimento la dissipazione di calore dai datacenter.

DC	Potenza IT (MW)	EER	Heat Dissipation (MW)	MAX TEORICO Heat Dissipation	Realistic Heat Dissipation (considerando Free-cooling
	MW		MW	MWh/anno	MWh/anno
MIL01	24	3,21	31,5	275940	217224
MIL02	5,6	3,36	7,3	63948	50340,8
MIL03	5	3,7	6,4	56064	44134,4
MIL07	12	3,3	15,7	137532	108267,2
MIL08 A	20	3,3	26,1	228636	179985,6
MIL08 B	5	3,69	6,4	56064	44134,4

ore annuo T< 7°C	ore annuo T> 7°C	
1864	6896	h

I valori di potenza dissipata di tabella seguente sono stati utilizzati come dati ingresso per le simulazioni.

6.2 Rilascio di vapore acqueo

Sulla base delle informazioni progettuali si è provveduto a verificare gli impianti installati in ognuno dei 6 datacenter. Nella seguente tabella un sintetico riepilogo delle apparecchiature previste in progetto.

Sito / Documento	Sistema analizzato	Tecnologia di raffreddamento	Evidenza da data sheet / specifica	Evaporazione d'acqua / rilascio di umidità in atmosfera
MIL08B – SMM 01_01 Chiller	Chiller Roccheggiani NRE-CWU_GF 1512	**Air-cooled water chiller with free-cooling glycol-free**	Il data sheet identifica l'unità come **air-cooled liquid chiller** con compressori semi-ermetici e ventilatori assiali; il free-cooling è gestito tramite circuito acqua/glicole e ventilazione, non tramite evaporazione d'acqua.	**No**. Non risultano torri evaporative, pacchi adiabatici, spray d'acqua o consumo evaporativo.
MIL08A – Air-cooled Chillers	Chiller air-cooled OFCI	**Air-cooled chiller con free-cooling diretto**	Il data sheet indica **Free Cooling Type: Direct** e, nella sezione **Adiabatic Cooling**, riporta **N/A – no**.	**No**. L'assenza di raffreddamento adiabatico esclude consumo evaporativo d'acqua come modalità di raffreddamento.
MIL07 – OFCI Air Cooled Chiller	Chiller air-cooled	**Air-cooled chiller con economizer/free-cooling**	La specifica riguarda **Air Cooled Chiller** e include circuito refrigerante, evaporatore, condensatore/ventilatori, economizer, hydronic package e controlli; non sono indicati sistemi evaporativi o torri evaporative.	**No**, sulla base della specifica disponibile. Non sono riportati sistemi spray, torri evaporative o sezioni adiabatiche.
MIL07 – DX Units	Unità DX indoor/outdoor Daikin	**Espansione diretta con refrigerante R-32**	Le unità sono descritte come **DX indoor and outdoor unit**, con refrigerante **R-32**; è	**No**. La condensa viene raccolta/scaricata; non

Sito / Documento	Sistema analizzato	Tecnologia di raffreddamento	Evidenza da data sheet / specifica	Evaporazione d'acqua / rilascio di umidità in atmosfera
			prevista **inox drip tray for condensate water**, cioè raccolta condensa, non evaporazione.	costituisce emissione di umidità in atmosfera.
MIL02 – Vertiv NIZ085	Chiller/free-cooling Vertiv NIZ085	**Chiller con microchannel condenser + microchannel free-cooling coil**	Il data sheet indica refrigerante **R1234ze**, fluido utente **water**, batterie **Microchannel Cond. + Microchannel FC Coil**, portata aria e circuito free-cooling con glicole etilenico al 25%; non risultano sezioni spray/adiabatiche.	**No**. Il free-cooling è a batteria, non evaporativo.
MIL03 – SMM 06 Chiller	Chiller HIREF TVXA1041	**Refrigeratore free-cooling aria-acqua**	Il documento identifica l'unità come **refrigeratore freecooling aria-acqua**; i dati riportano lato utenza acqua, lato sorgente aria, ventilatori sorgente e refrigerante R1234ze.	**No**, sulla base del data sheet fornito. Non risultano torri evaporative, spray o raffreddamento adiabatico.
MIL01 – Munters OASIS TSC500	Unità Munters OASIS TSC500	**Air-to-air energy saving system con modulo EPX / funzionamento wet**	Il documento indica **minimum temperature for spray operation 5.0 °C**, **minimum air temperature for wet use 5.0 °C**, **spray flow 3.0 l/s** ed **evaporated water 272 l/h**.	**Sì**. È presente evaporazione d'acqua in condizioni di funzionamento wet/spray.

Pertanto è evidente come solo nel DC MIL01 siano presenti impianti in grado di emettere vapore acqueo durante il funzionamento. Per i DC MIL01 è stato possibile stimare una emissione totale complessiva di circa 300 kg/h di vapore nella condizione massima di carico critico.

L'effetto microclimatico associato alle sorgenti emissive è stato valutato principalmente in termini di dissipazione termica, mediante il calcolo dell'incremento di temperatura dell'aria e della conseguente variazione dell'umidità relativa. Si considera infatti le sorgenti come apporti energetici espressi in Watt termici, distribuiti spazialmente sulla griglia di calcolo e verticalmente sui livelli atmosferici considerati.

L'emissione di vapore acqueo localizzata da un datacenter risulta trascurabile rispetto alla massa d'aria verso cui si rilascia. Tale valore, rapportato alla portata massica d'aria che attraversa una delle celle ci calcolo o meglio la sezione di calcolo di 400 m per 20 m anche nelle condizioni conservative di vento minimo pari a 0,5 m/s, determina un incremento dell'umidità specifica è stimabile in circa 0.1 g/kg. Tale massa di vapore può determinare una variazione della umidità relativa variabile in funzione delle condizioni meteorologiche tra +2,9 % UR in inverno e +0,4 % UR in periodi estivi.

Anche l'eventuale contributo energetico associato al calore latente del vapore risulterebbe marginale, e quindi trascurabile rispetto alle potenze termiche dissipate dalle apparecchiature del Data Center, che sono dell'ordine di decine di MWt. Pertanto, ai fini della valutazione microclimatica condotta, l'emissione di vapore

acqueo indicata da MIL01 non è ritenuta significativa e non modifica in modo apprezzabile i risultati di temperatura, umidità relativa, stabilità locale o condizioni di dispersione atmosferica.

7 APPLICAZIONE DEL CODICE CALMET

È stato applicato il codice di calcolo CALMET per la ricostruzione del campo di vento 3D ed il calcolo dei parametri micrometeorologici sull'area di studio. I dati di ingresso al modello sono stati selezionati nell'anno meteorologico 2024 con i dati di superficie della stazione di Lacchiarella di ARPA Lombardia e dati di profili in quota derivati dal modello WRF di LaMMA Ufficio meteorologico della Regione Toscana. La griglia di calcolo è stata impostata per un dominio di 10 km x 10 km, si veda figura seguente.

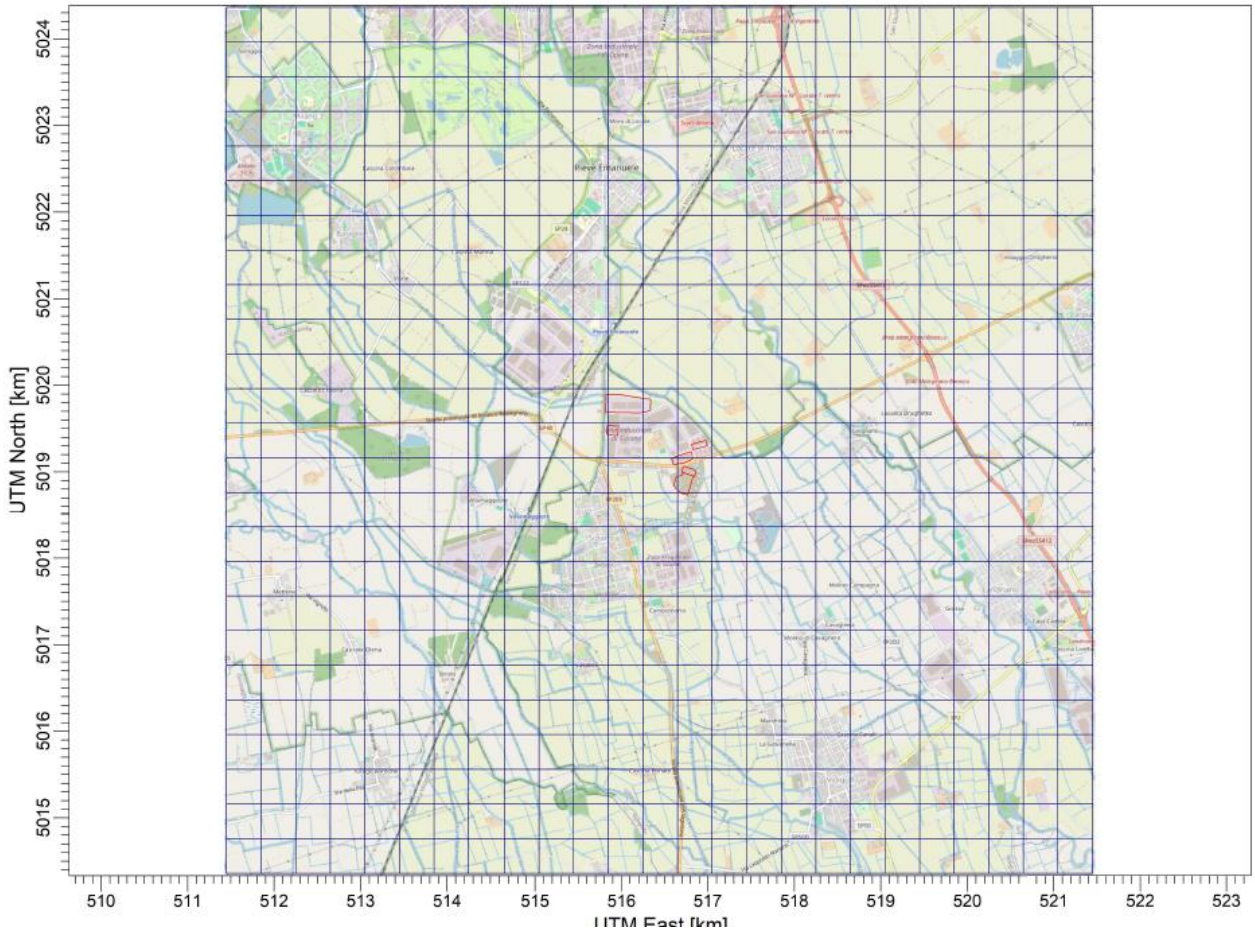

Figura 3 dominio di calcolo di CALMET su griglia con passo di 400 metri.

I dati estratti in corrispondenza del centro dei Datacenter tramite il processore PRTMET sono elaborati e commentati di seguito.

Tabella 3 elaborazione del parametro Classi di Stabilità elaborate da CALMET estratte in corrispondenza del DC.

Mese	Classe 1 %	Classe 2 %	Classe 3 %	Classe 4 %	Classe 5 %	Classe 6 %
Gennaio	0,00	25,94	11,56	0,00	0,00	62,50
Febbraio	0,43	28,30	14,22	0,00	0,00	57,04
Marzo	2,82	28,23	17,88	0,00	0,54	50,54
Aprile	12,78	24,72	17,78	0,00	0,28	44,44
Maggio	23,52	22,45	15,73	0,00	0,00	38,31
Giugno	20,83	25,00	12,50	0,14	0,00	41,53
Luglio	35,48	20,56	14,52	1,88	0,13	27,42

Mese	Classe 1 %	Classe 2 %	Classe 3 %	Classe 4 %	Classe 5 %	Classe 6 %
Agosto	22,85	29,17	13,31	0,40	0,00	34,27
Settembre	10,14	27,50	14,86	1,25	0,00	46,25
Ottobre	2,55	27,28	13,58	0,13	0,00	56,45
Novembre	1,25	21,53	12,78	0,00	0,00	64,44
Dicembre	2,15	21,35	14,38	0,07	0,07	61,96

Tabella 4 elaborazione del parametro Altezza dello strato di mescolamento elaborate da CALMET estratte in corrispondenza del DC.

Mese	Media m	Minimo m	Massimo m
Gennaio	148,99	50,00	902,55
Febbraio	252,76	50,00	1446,13
Marzo	448,43	50,00	2320,19
Aprile	619,90	50,00	2911,62
Maggio	833,98	50,00	2817,03
Giugno	849,19	50,00	2529,56
Luglio	835,13	50,00	2410,34
Agosto	745,86	50,00	2395,73
Settembre	601,87	50,00	2445,36
Ottobre	334,65	50,00	1606,08
Novembre	175,59	50,00	1065,76
Dicembre	138,46	50,00	851,39

Tabella 5 elaborazione del parametro velocità del vento elaborate da CALMET estratte in corrispondenza del DC.

Mese	Media m/s	Minimo m/s	Massimo m/s
Gennaio	0,59	0,00	2,60
Febbraio	0,68	0,00	3,40
Marzo	0,95	0,00	4,60
Aprile	0,65	0,00	3,40
Maggio	0,53	0,00	2,00
Giugno	0,48	0,00	2,20
Luglio	0,54	0,00	2,40
Agosto	0,47	0,00	2,30
Settembre	0,53	0,00	2,10
Ottobre	0,55	0,00	2,80
Novembre	0,36	0,00	2,50
Dicembre	0,51	0,00	2,20

Tabella 6 elaborazione del parametro pressione atmosferica elaborate da CALMET estratte in corrispondenza del DC.

Mese	Media mbar	Minimo mbar	Massimo mbar
Gennaio	1001,50	978,40	1020,20
Febbraio	997,57	970,80	1013,90
Marzo	993,35	973,80	1004,90
Aprile	997,68	982,20	1012,80

Mese	Media mbar	Minimo mbar	Massimo mbar
Maggio	994,88	984,90	1003,10
Giugno	995,31	985,20	1001,00
Luglio	995,32	988,20	1003,00
Agosto	995,62	987,60	1002,20
Settembre	995,56	985,30	1006,40
Ottobre	1000,11	978,80	1011,50
Novembre	1004,46	975,60	1014,20
Dicembre	1004,89	986,00	1016,90

Tabella 7 elaborazione del parametro umidità relativa elaborate da CALMET estratte in corrispondenza del DC.

Mese	Media %	Minimo %	Massimo %
Gennaio	92,05	43,80	99,30
Febbraio	90,95	47,50	99,30
Marzo	83,07	18,70	99,30
Aprile	72,42	14,00	99,30
Maggio	76,87	32,40	99,30
Giugno	74,05	40,90	99,20
Luglio	65,81	35,10	99,20
Agosto	67,91	37,00	99,20
Settembre	74,03	21,30	99,30
Ottobre	92,34	50,00	99,30
Novembre	90,83	21,10	99,40
Dicembre	87,25	18,10	99,50

Tabella 8 elaborazione del parametro temperatura dell'aria elaborate da CALMET estratte in corrispondenza del DC.

Mese	Media °C	Minimo °C	Massimo °C
Gennaio	3,20	-4,05	16,45
Febbraio	8,56	-2,25	18,25
Marzo	11,21	0,05	21,85
Aprile	14,20	0,05	30,15
Maggio	17,74	0,05	27,95
Giugno	22,07	13,35	32,55
Luglio	26,67	16,65	35,45
Agosto	26,82	18,45	37,05
Settembre	19,70	9,25	34,95
Ottobre	15,62	9,05	23,25
Novembre	7,23	-1,75	21,65
Dicembre	3,67	-3,35	14,45

L'analisi stagionale dei dati meteorologici riferiti all'area di Siziano evidenzia un andamento coerente con il contesto della pianura lombarda, caratterizzato da una marcata stagionalità delle condizioni termo-igrometriche e dispersive.

In particolare, il **periodo invernale** risulta contraddistinto da temperature contenute, elevati valori di umidità relativa, ventilazione generalmente debole e ridotti valori di altezza di rimescolamento, condizioni che favoriscono una minore capacità dispersiva dell'atmosfera e una maggiore tendenza al ristagno degli inquinanti negli strati prossimi al suolo. Nei mesi di dicembre, gennaio e febbraio, infatti, la temperatura media mensile si mantiene su valori bassi, pari rispettivamente a 3,67 °C, 3,20 °C e 8,56 °C, con un minimo assoluto pari a -4,05 °C nel mese di gennaio. Contestualmente, l'umidità relativa media risulta molto elevata, con valori pari a 87,25% in dicembre, 92,05% in gennaio e 90,95% in febbraio, rappresentativi di condizioni atmosferiche frequentemente prossime alla saturazione. La velocità media del vento si mantiene su valori modesti, compresi tra 0,51 m/s e 0,68 m/s, mentre il mixing height medio assume valori ridotti, pari a 138,46 m in dicembre, 148,99 m in gennaio e 252,76 m in febbraio. La distribuzione delle classi PGT conferma tale quadro, evidenziando una netta prevalenza della classe stabile 6, che rappresenta il 61,96% delle ore in dicembre, il 62,50% in gennaio e il 57,04% in febbraio. Tali condizioni sono tipiche dei mesi freddi nelle aree di pianura, dove la stabilità atmosferica, la scarsa ventilazione e la ridotta turbolenza verticale possono determinare condizioni meno favorevoli alla dispersione.

Nel **periodo primaverile**, da marzo a maggio, i dati mostrano un progressivo miglioramento delle condizioni dispersive, associato all'aumento della temperatura e allo sviluppo dello strato rimescolato. Le temperature medie mensili passano da 11,21 °C in marzo a 14,20 °C in aprile, fino a 17,74 °C in maggio, mentre l'umidità relativa media diminuisce rispetto al periodo invernale, attestandosi su 83,07% in marzo, 72,42% in aprile e 76,87% in maggio. La ventilazione rimane complessivamente debole, con valori medi di 0,95 m/s in marzo, 0,65 m/s in aprile e 0,53 m/s in maggio, ma il parametro maggiormente indicativo del cambiamento stagionale è rappresentato dal mixing height, che aumenta sensibilmente da 448,43 m in marzo a 619,90 m in aprile, fino a 833,98 m in maggio. Anche i valori massimi mensili del mixing height, pari a 2320,19 m in marzo, 2911,62 m in aprile e 2817,03 m in maggio, evidenziano la presenza di fasi diurne caratterizzate da maggiore turbolenza convettiva. In parallelo si osserva una progressiva riduzione della classe PGT 6, che passa dal 50,54% di marzo al 44,44% di aprile e al 38,31% di maggio, e un incremento delle classi più instabili, in particolare della classe 1, che raggiunge il 23,52% delle ore nel mese di maggio. Questo andamento indica una transizione verso condizioni più favorevoli alla diluizione verticale degli inquinanti.

La **stagione estiva**, comprendente giugno, luglio e agosto, rappresenta il periodo con le temperature più elevate e con la maggiore capacità di rimescolamento verticale. Le temperature medie mensili risultano pari a 22,07 °C in giugno, 26,67 °C in luglio e 26,82 °C in agosto, con massimi assoluti fino a 37,05 °C nel mese di agosto. L'umidità relativa media si riduce rispetto ai mesi freddi, con valori pari a 74,05% in giugno, 65,81% in luglio e 67,91% in agosto. La velocità media del vento rimane contenuta anche nel periodo estivo, compresa tra 0,47 m/s e 0,54 m/s; tuttavia, l'elevato riscaldamento diurno favorisce lo sviluppo verticale dello strato limite atmosferico, con mixing height medi pari a 849,19 m in giugno, 835,13 m in luglio e 745,86 m in agosto. La maggiore instabilità atmosferica è confermata dalla distribuzione delle classi PGT: nel mese di luglio la classe 1 raggiunge il 35,48% delle ore, mentre la classe 6 scende al 27,42%, valore minimo dell'intero anno. Anche in agosto la classe stabile 6 si mantiene su un valore relativamente ridotto, pari al 34,27%, a fronte di una presenza significativa delle classi più instabili. In termini dispersivi, il periodo estivo risulta quindi generalmente più favorevole rispetto a quello invernale, pur permanendo condizioni di bassa ventilazione orizzontale.

Nel **periodo autunnale**, da settembre a novembre, si osserva una progressiva transizione verso condizioni nuovamente più stabili. La temperatura media mensile diminuisce da 19,70 °C in settembre a 15,62 °C in ottobre e 7,23 °C in novembre, mentre l'umidità relativa aumenta sensibilmente, raggiungendo valori medi pari a 92,34% in ottobre e 90,83% in novembre. La velocità media del vento resta bassa, con valori pari a 0,53 m/s in settembre, 0,55 m/s in ottobre e 0,36 m/s in novembre, quest'ultimo rappresentativo di condizioni di ventilazione particolarmente debole. Anche il mixing height si riduce progressivamente, passando da 601,87 m in settembre a 334,65 m in ottobre e 175,59 m in novembre. Tale andamento evidenzia una diminuzione della capacità di rimescolamento verticale dell'atmosfera, confermata dall'aumento della classe PGT 6, che passa dal 46,25% di settembre al 56,45% di ottobre, fino al 64,44% di novembre, valore più elevato dell'intera serie annuale. Per l'area di Siziano, novembre rappresenta quindi uno dei mesi più critici sotto il profilo della dispersione atmosferica, in ragione della combinazione tra elevata stabilità, umidità elevata, debole ventilazione e ridotta altezza di rimescolamento.

Nel complesso, i dati elaborati per l'area di Siziano indicano che le condizioni meteorologiche meno favorevoli alla dispersione degli inquinanti si concentrano nel periodo tardo-autunnale e invernale, in particolare nei mesi di novembre, dicembre e gennaio, caratterizzati da elevata frequenza di condizioni stabili, umidità relativa elevata, bassa ventilazione e mixing height medi generalmente inferiori a circa 180 m. Al contrario, le condizioni più favorevoli alla diluizione e al trasporto verticale si osservano tra maggio e agosto, quando il mixing height medio si colloca tra circa 746 m e 849 m e aumenta la frequenza delle classi PGT instabili, con il massimo di instabilità nel mese di luglio. Tale comportamento stagionale è rilevante ai fini della valutazione modellistica della qualità dell'aria, poiché suggerisce che, nell'area di Siziano e più in generale nel contesto della pianura lombarda, gli scenari invernali e tardo-autunnali possono rappresentare le condizioni maggiormente cautelative per la valutazione delle ricadute al suolo, mentre il periodo caldo presenta, in media, una maggiore capacità dispersiva atmosferica.

8 APPLICAZIONE del MODELLO A BOX

I dati elaborati da CALMET per ogni cella del dominio di calcolo sono stati estratti con il processore PRTMET ed elaborati per il calcolo dell'impatto delle emissioni di calore determinate dall'esercizio dei building. Come riportato in precedenza ognuno dei 6 building ha caratteristiche e dimensioni differenti in termini di emissioni di energia termica e pertanto nella rappresentazione tecnica si è considerato che questi contribuissero indipendentemente o contestualmente in relazione alla loro posizione geografica.

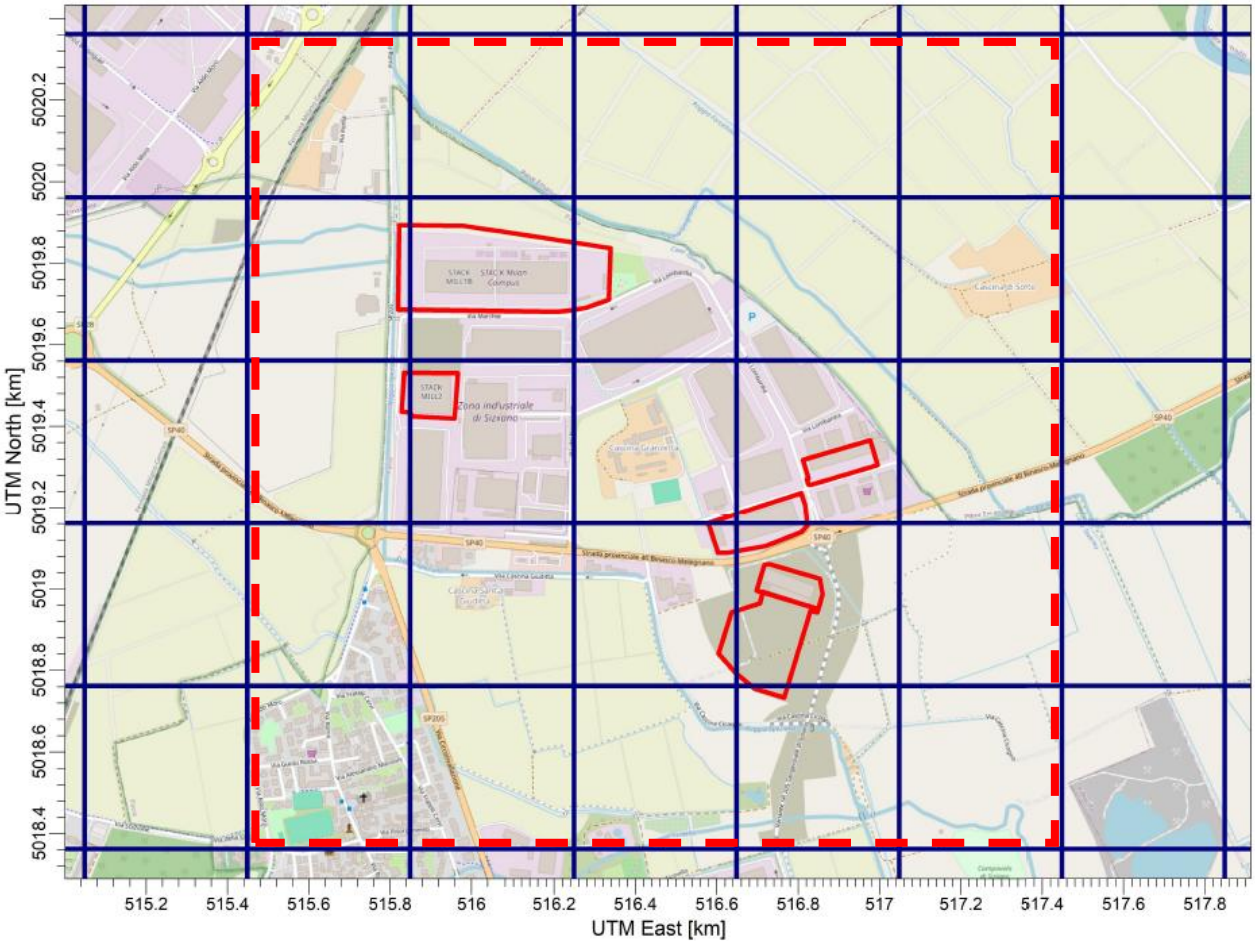

Figura 4 griglia di calcolo di dimensioni 5 celle per 5 celle di 400 metri.

In relazione alla schematizzazione del modello si è considerato ogni edificio con la posizione del suo baricentro rispetto ai biulding principali che contengono gli impianti tecnologici con dissipazione di calore. Pertanto, la cella R2_C2 conterrà le emissioni di MIL01, la cella R3_C2 le emissioni di MIL02, la R4_C4 la somma delle emissioni di MIL08A +MIL08B + 50% delle emissioni di MIL07 e la cella la R3_C4 la somma delle emissioni di MIL03 e la quota del 50% di MIL07.

Tabella 9 classificazione delle celle del primo livello del dominio.

	C1	C2	C3	C4	C5
R1	R1_C1	R1_C2	R1_C3	R1_C4	R1_C5
R2	R2_C1	**R2_C2**	R2_C3	R2_C4	R2_C5
R3	R3_C1	**R3_C2**	R3_C3	**R3_C4**	R3_C5
R4	R4_C1	R4_C2	R4_C3	**R4_C4**	R4_C5
R5	R5_C1	R5_C2	R5_C3	R5_C4	R5_C5

Tabella 10 potenze inserite in ogni cella del primo livello del dominio.

	C1	C2	C3	C4	C5
R1	0 MWt	0 MWt	0 MWt	0 MWt	0 MWt
R2	0 MWt	**31,5 MWt**	0 MWt	0 MWt	0 MWt
R3	0 MWt	**7,3 MWt**	0 MWt	**14,25 MWt**	0 MWt
R4	0 MWt	0 MWt	0 MWt	**40,35 MWt**	0 MWt
R5	0 MWt	0 MWt	0 MWt	0 MWt	0 MWt

La simulazione è stata svolta per un numero di ore pari a 8784, le ore solari dell'anno 2024. Per ognuna delle 25 celle del livello a 10 metri e per restati 25 celle per ognuno dei livelli verticali è stato calcolato l'impatto delle emissioni di calore sui parametri temperatura dell'aria e umidità relativa.

8.1 Risultati

La simulazione propone ora per ora dell'anno solare 2024 la variazione di temperatura e di umidità relativa per ogni cella di calcolo e per ogni livello verticale. Per semplificare l'analisi si propone una lettura dei risultati su base mensile così da poter apprezzare gli effetti e variabilità dei parametri allo studio.

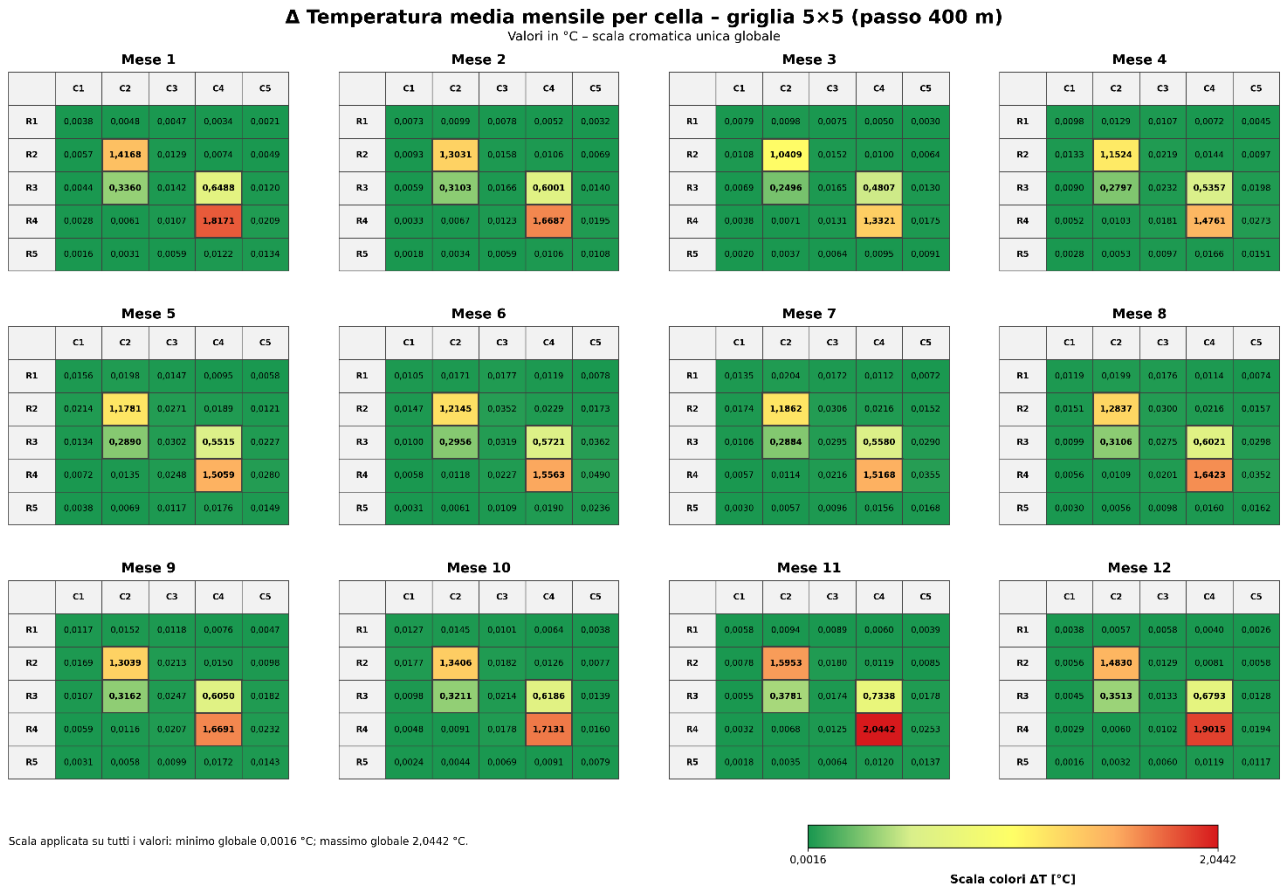

Figura 5 variazione media mensile (mese 1-Gennario – mese 12 Dicembre) della temperatura dell'aria per ogni cella del dominio di calcolo.

La figura relativa alla variazione media mensile di temperatura evidenzia una distribuzione spaziale fortemente concentrata nelle celle in cui è presente il contributo emissivo termico, con valori massimi localizzati in corrispondenza delle celle R2_C2 e soprattutto R4_C4, oltre a contributi secondari nelle celle R3_C2 e R3_C4. I valori minimi risultano dell'ordine di pochi millesimi di grado, con minimo globale pari a 0,0016 °C, mentre il massimo globale raggiunge 2,0442 °C nella cella R4_C4 nel mese di novembre. Nel complesso, la figura mostra che l'effetto termico medio mensile rimane molto contenuto nella maggior parte delle celle del dominio, generalmente inferiore a pochi centesimi di grado nelle aree più periferiche, mentre assume valori sensibilmente maggiori solo nelle celle sorgente o immediatamente influenzate dal rilascio di calore. Tale andamento conferma una marcata localizzazione spaziale dell'impatto, con un gradiente termico netto tra le celle emissive e il resto della griglia. Dal punto di vista stagionale si osserva una maggiore evidenza dei massimi nei mesi autunnali e invernali, in particolare tra ottobre, novembre, dicembre e gennaio, coerentemente con condizioni atmosferiche mediamente meno dispersive, caratterizzate da maggiore stabilità e minore altezza di rimescolamento. Nei mesi più caldi, pur permanendo incrementi localizzati nelle celle emissive, la maggiore capacità di rimescolamento atmosferico tende a favorire una più efficace diluizione verticale del contributo termico.

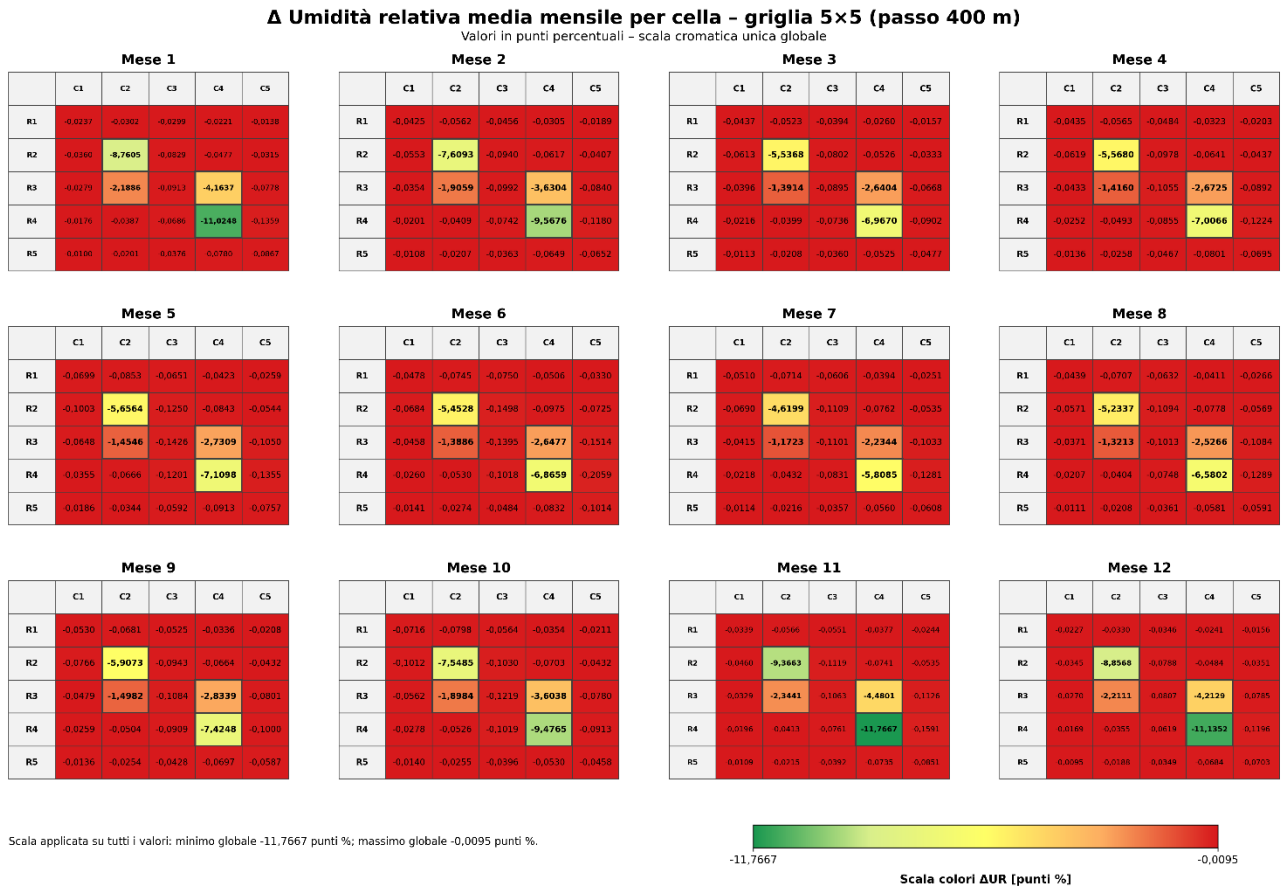

Figura 6 variazione media mensile (mese 1-Gennario – mese 12 Dicembre) della umidità relativa per ogni cella del dominio di calcolo.

La figura relativa alla variazione media mensile dell'umidità relativa mostra un comportamento coerente con l'incremento di temperatura prodotto dal rilascio di calore sensibile: tutte le variazioni risultano negative, indicando una riduzione locale dell'umidità relativa rispetto alla condizione ante operam. Questo effetto è fisicamente atteso poiché, a parità di contenuto assoluto di vapore acqueo, l'aumento della temperatura dell'aria determina una diminuzione della saturazione relativa e quindi una riduzione della UR espressa in punti percentuali. Anche in questo caso la distribuzione spaziale risulta concentrata nelle celle maggiormente interessate dall'incremento termico, con le riduzioni più marcate in corrispondenza delle celle R2_C2 e R4_C4, e contributi secondari nelle celle R3_C2 e R3_C4. La massima riduzione media mensile si osserva nel mese di novembre nella cella R4_C4, con valori dell'ordine di -11,77 punti percentuali, mentre nelle celle periferiche le variazioni sono generalmente molto più contenute, spesso inferiori a pochi decimi o centesimi di punto percentuale. La lettura congiunta delle due figure evidenzia quindi una relazione diretta tra aumento di temperatura e diminuzione dell'umidità relativa: dove il ΔT è più elevato, il ΔUR risulta più negativo. Anche per l'umidità relativa l'effetto appare prevalentemente locale e maggiormente accentuato nei mesi con condizioni atmosferiche meno favorevoli alla dispersione, mentre nelle aree esterne alle celle emissive la variazione risulta trascurabile ai fini microclimatici generali.

Nelle figure seguenti si mostra il dettaglio dell'analisi dei risultati che mostrano oltre alle medie mensili anche il valore massimo orario e minimo orario della variazione di temperatura. Le figure si riferiscono alle celle con emissioni di calore dai datacenter.

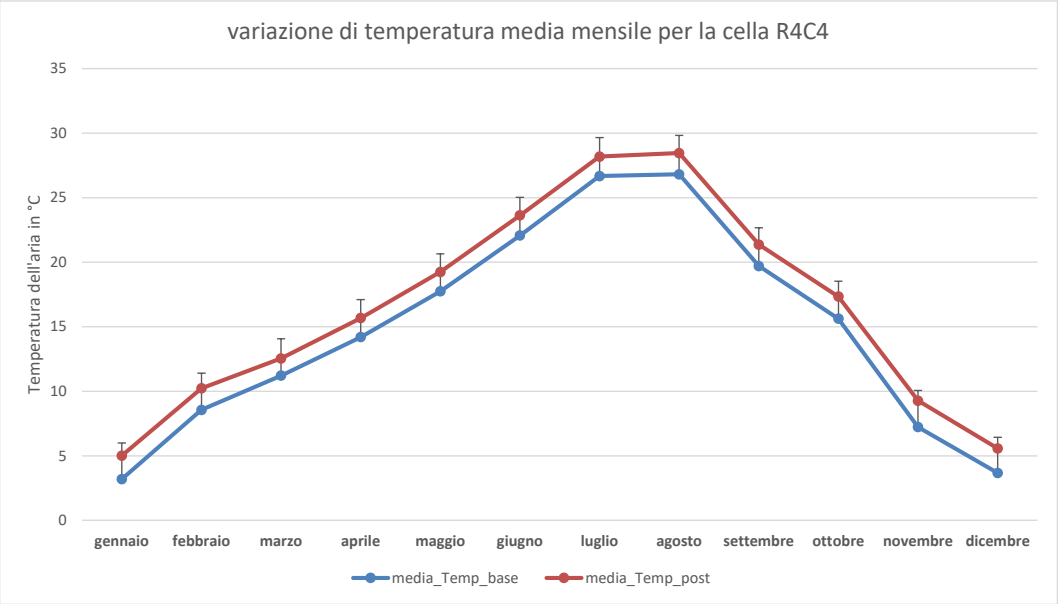

Figura 7 variazione di temperatura media mensile, massima oraria e minima oraria per la cella R4C4 relativa alle emissioni di MIL 8 e 50% di MIL07.

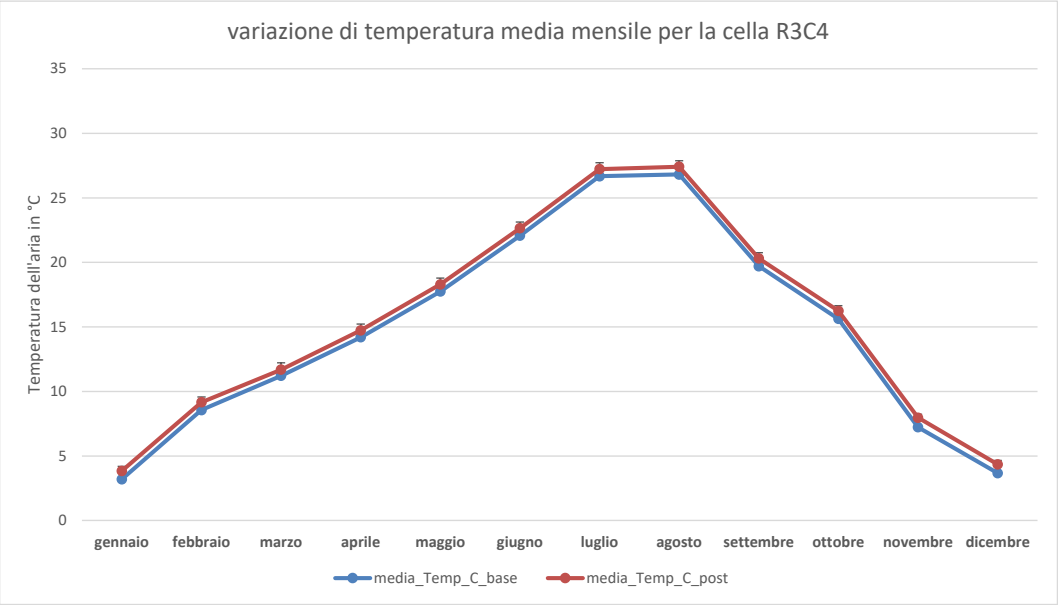

Figura 8 variazione di temperatura media mensile, massima oraria e minima oraria per la cella R3C4 relativa alle emissioni di MIL 3 e 50% di MIL07.

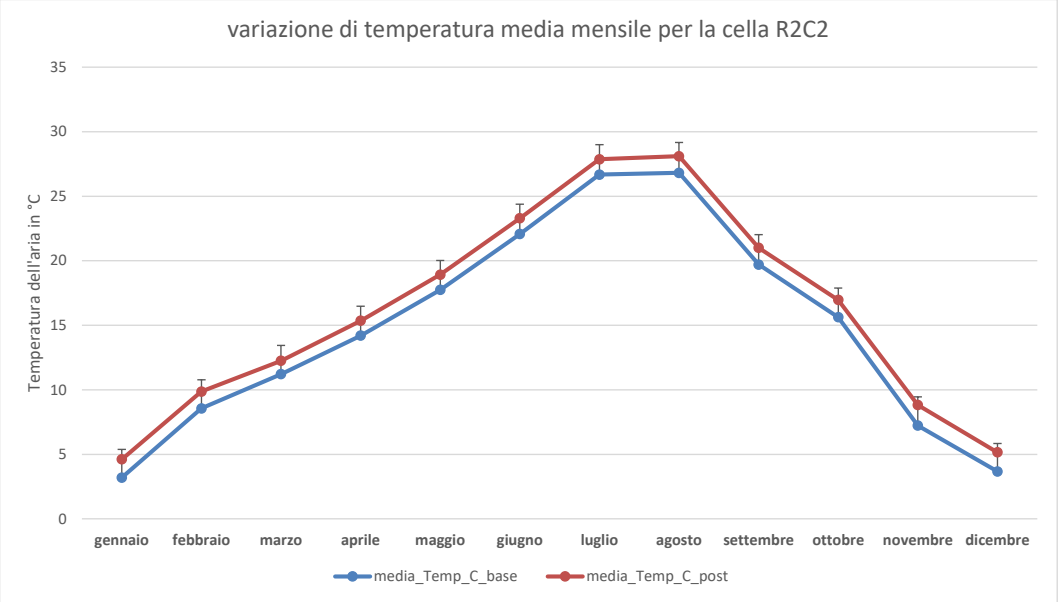

Figura 9 variazione di temperatura media mensile, massima oraria e minima oraria per la cella R2C2 relativa alle emissioni di MIL 1.

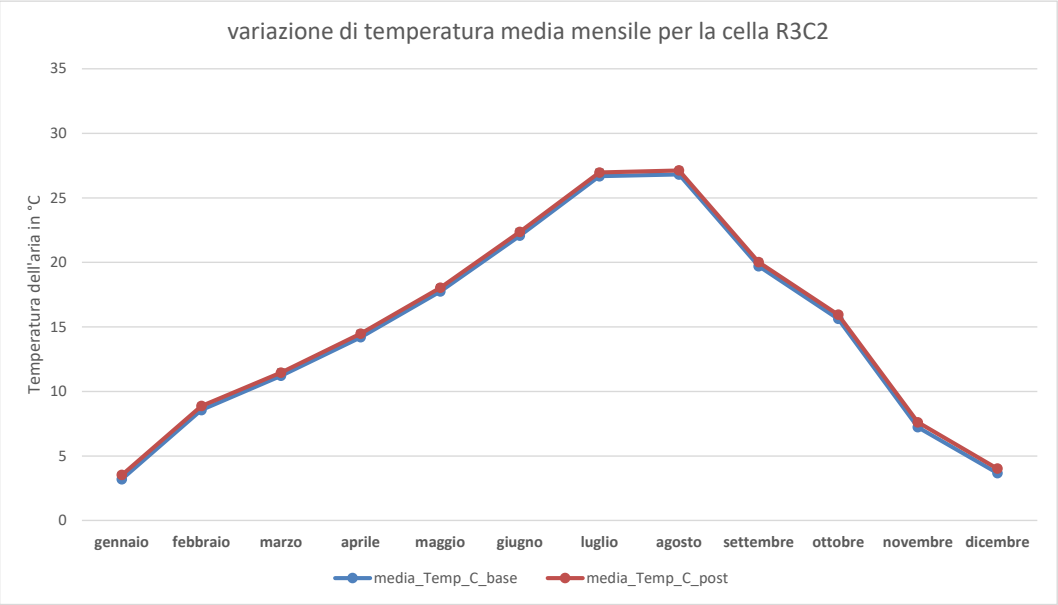

Figura 10 variazione di temperatura media mensile, massima oraria e minima oraria per la cella R3C2 relativa alle emissioni di MIL 2.

Nelle seguenti figure l'analisi della variazione della temperatura dell'aria nei profili in quota relativi alle singole celle del dominio.

Nelle figure riportate è presentato il dettaglio dell'analisi delle variazioni di temperatura dell'aria nelle celle della griglia interessate direttamente dalle emissioni termiche dei data center, con riferimento sia all'andamento medio mensile al livello di 10 m, sia alla distribuzione verticale lungo il profilo atmosferico. Le prime figure confrontano, per le celle emissive R4C4, R3C4, R2C2 e R3C2, la temperatura media mensile ante operam e post operam, evidenziando come l'effetto del calore dissipato si traduca in un incremento

sistematico della temperatura calcolata, più evidente nelle celle caratterizzate dai maggiori carichi termici. In particolare, la cella R4C4, associata alle emissioni di MIL 8 e al 50% di MIL07, mostra la separazione più marcata tra curva base e curva post operam, coerentemente con il ruolo di principale area emissiva del dominio. Anche la cella R2C2, relativa a MIL 1, presenta un incremento apprezzabile, mentre nelle celle R3C4 e R3C2, associate rispettivamente a MIL 3 + 50% MIL07 e a MIL 2, l'effetto risulta più contenuto ma comunque riconoscibile. Le curve mantengono in tutti i casi il tipico andamento stagionale della temperatura dell'aria, con valori minimi nei mesi invernali, progressivo incremento primaverile, massimo estivo tra luglio e agosto e successiva riduzione nel periodo autunnale-invernale.

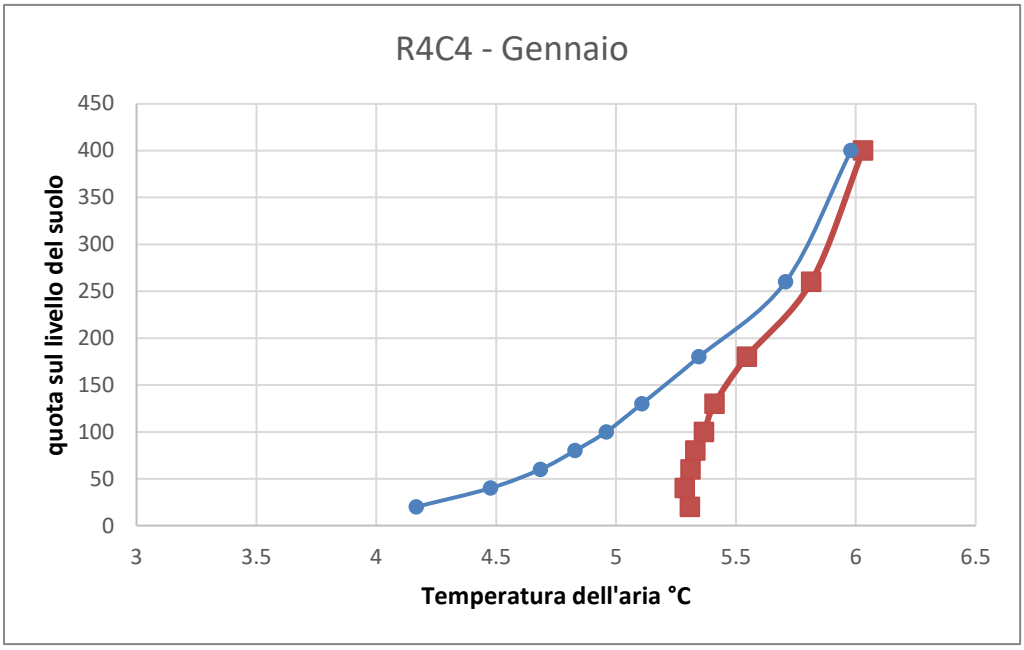

Figura 11 variazione di temperatura media mensile per la cella R4C4 relativa alle emissioni di MIL 8 e 50% di MIL07 per il mese di Gennaio.

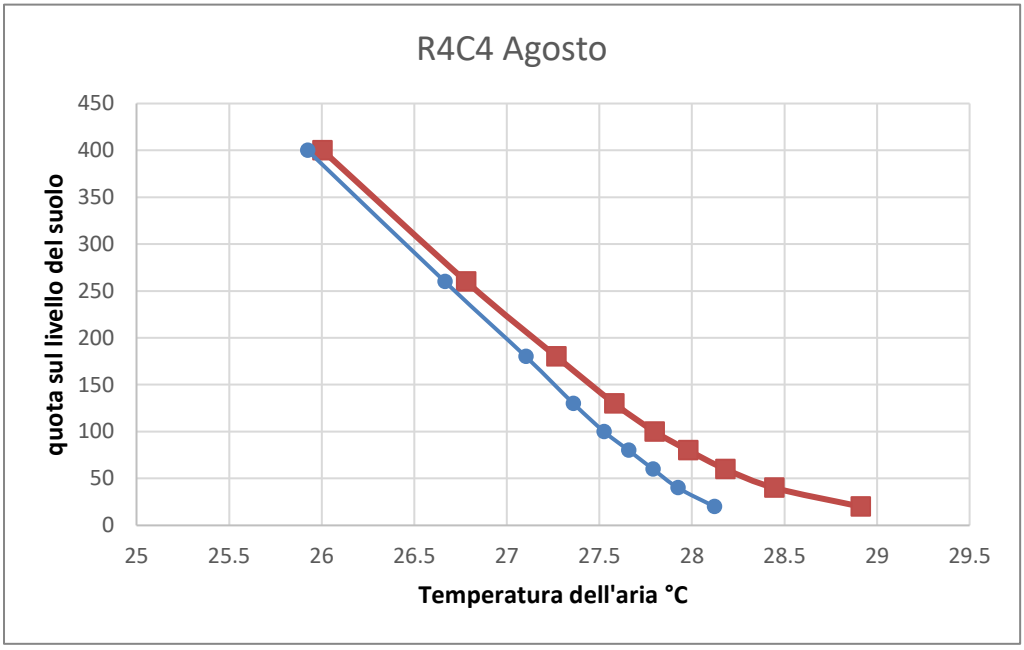

Figura 12 variazione di temperatura media mensile per la cella R4C4 relativa alle emissioni di MIL 8 e 50% di MIL07 per il mese di Agosto.

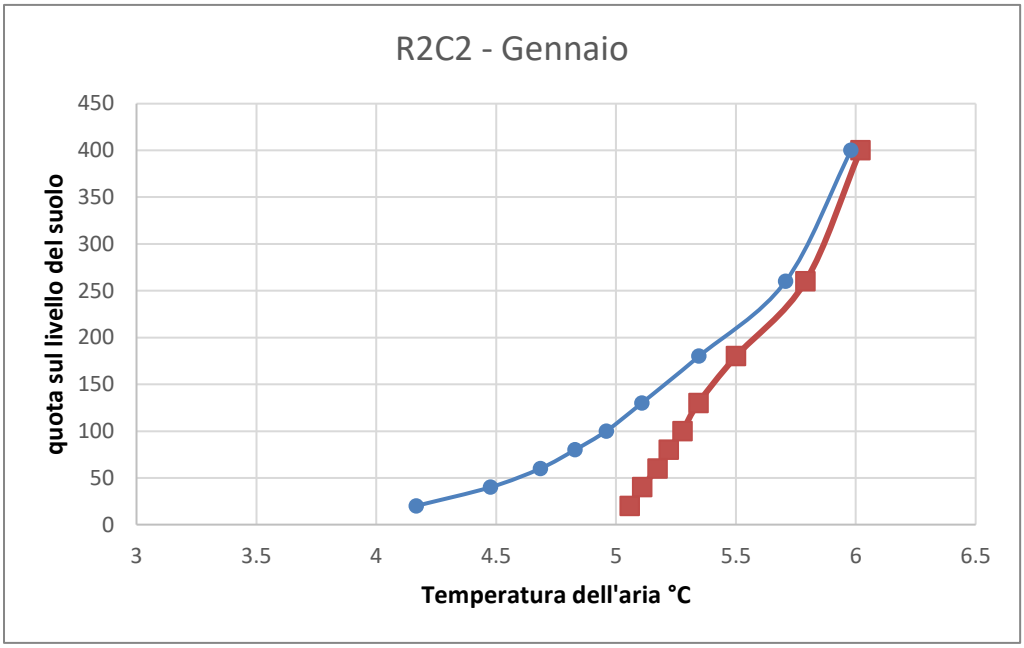

Figura 13 variazione di temperatura media mensile per la cella R2C2 relativa alle emissioni di MIL 1 per il mese di Gennaio.

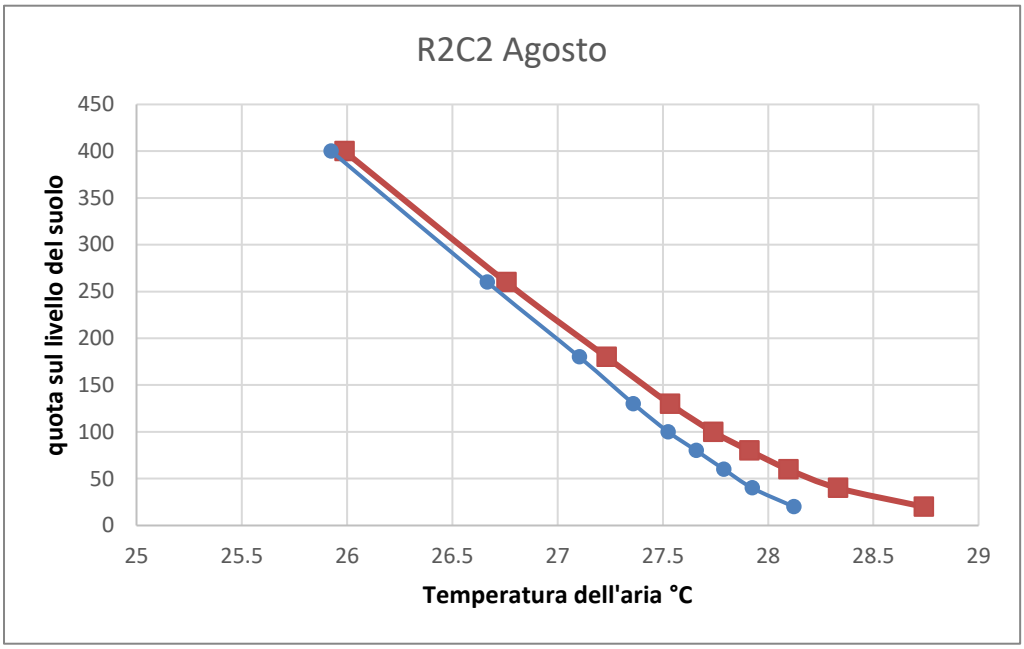

Figura 14 variazione di temperatura media mensile per la cella R2C2 relativa alle emissioni di MIL 1 per il mese di Agosto.

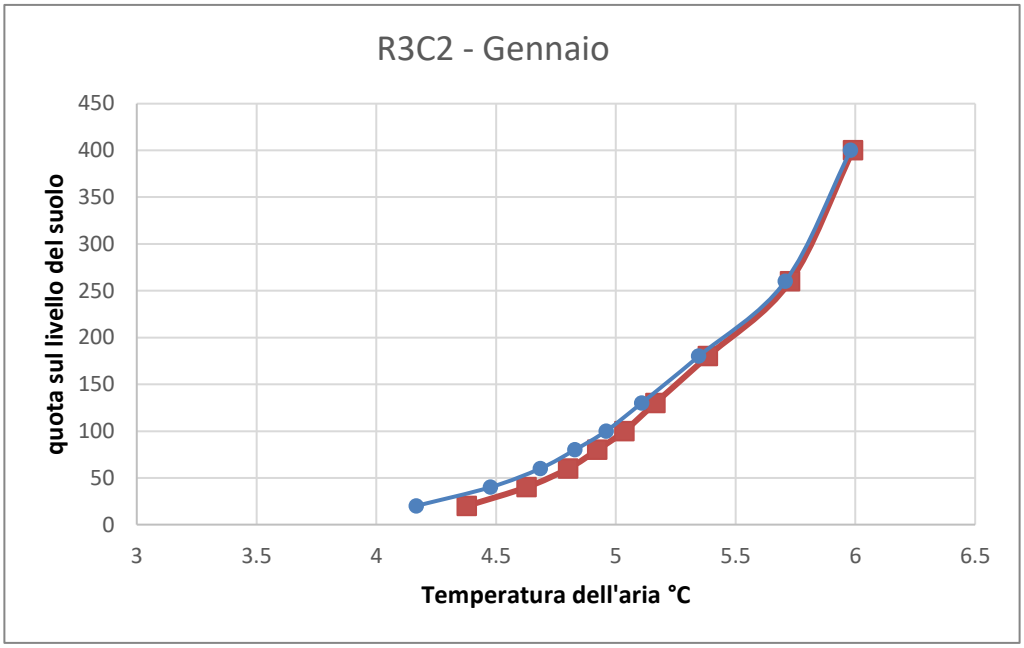

Figura 15 variazione di temperatura media mensile per la cella R3C2 relativa alle emissioni di MIL 2 per il mese di Gennaio.

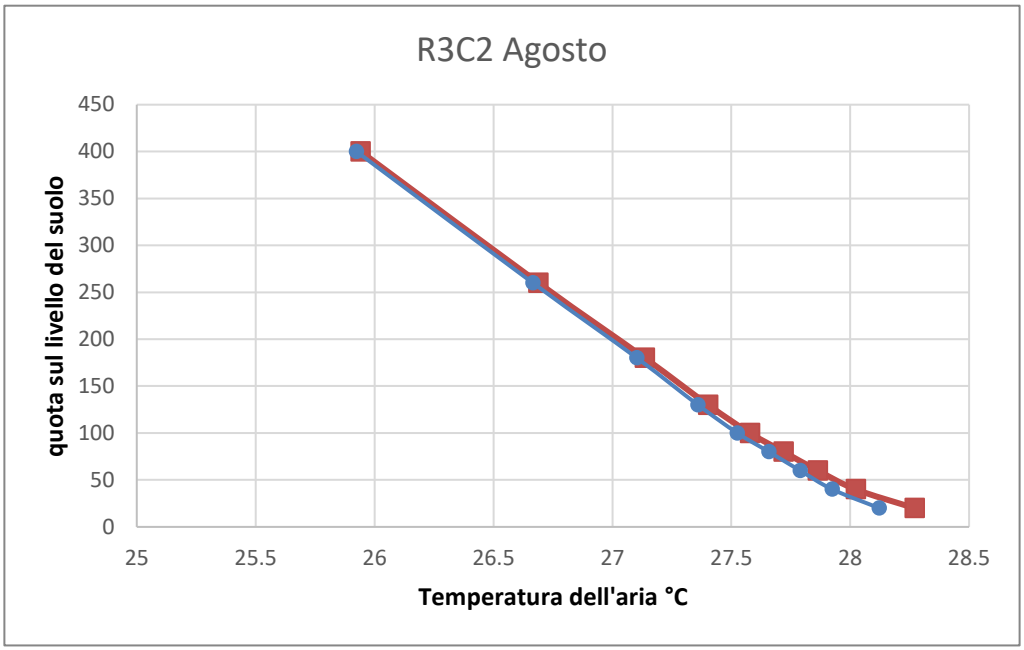

Figura 16 variazione di temperatura media mensile per la cella R3C2 relativa alle emissioni di MIL 2 per il mese di Agosto.

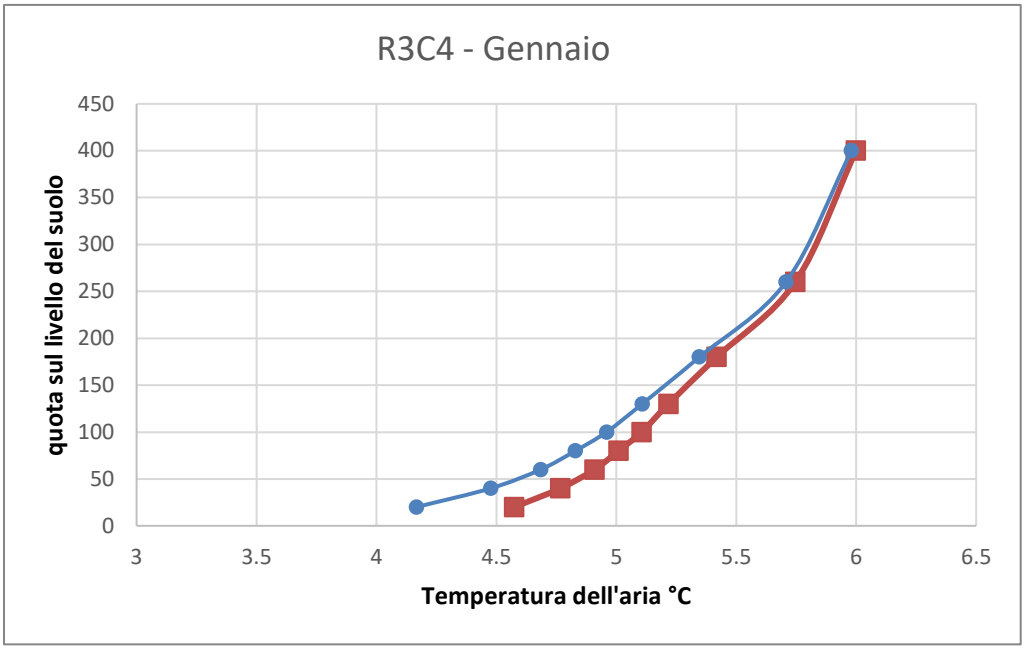

Figura 17 variazione di temperatura media mensile per la cella R3C4 relativa alle emissioni di MIL 3 e 50% MIL07 per il mese di Gennaio.

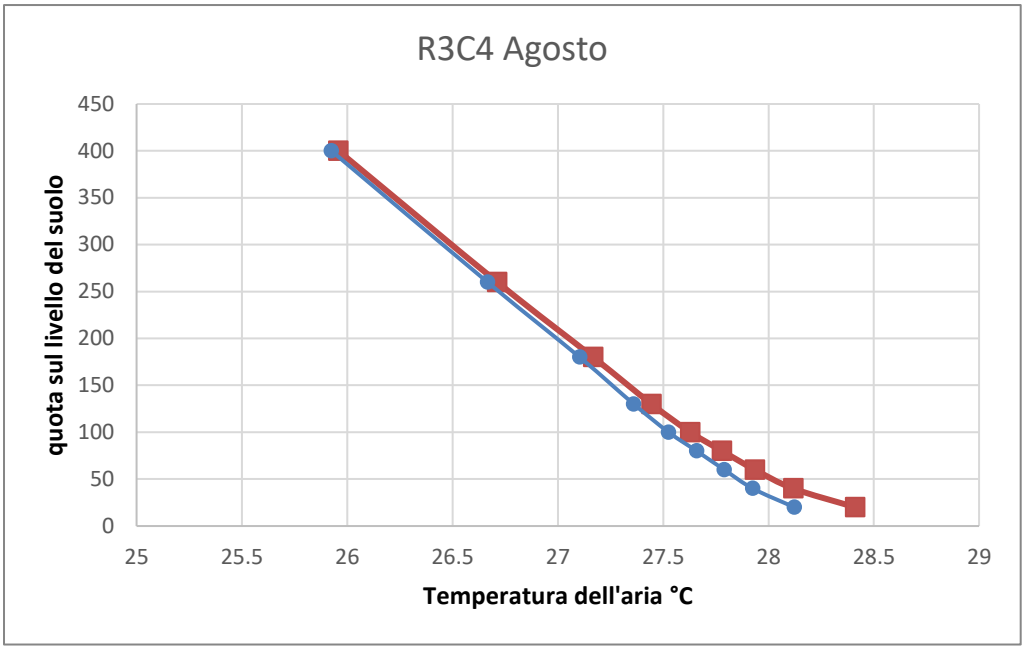

Figura 18 variazione di temperatura media mensile per la cella R3C4 relativa alle emissioni di MIL 3 e 50% MIL07 per il mese di Agosto.

Le figure mostrate approfondiscono la variazione lungo la verticale, confrontando i profili di temperatura ante e post operam per i mesi di gennaio e agosto nelle medesime celle emissive. Tali grafici mostrano che l'effetto termico non è distribuito uniformemente lungo tutta la colonna atmosferica, ma tende a concentrarsi maggiormente nei livelli prossimi alla quota di rilascio e nei primi strati atmosferici interessati dalla redistribuzione del calore. Nel mese di gennaio, caratterizzato da condizioni mediamente più stabili e

da minore capacità di rimescolamento verticale, la differenza tra profilo base e profilo post operam risulta più evidente nei livelli inferiori e intermedi della colonna, confermando la maggiore tendenza al confinamento locale dell'anomalia termica. Nel mese di agosto, invece, pur permanendo un incremento della temperatura post operam, il profilo risulta maggiormente distribuito lungo la verticale, coerentemente con condizioni atmosferiche più favorevoli al rimescolamento. Nel complesso, le figure confermano che l'impatto termico associato all'esercizio dei data center è riconoscibile nelle celle emissive, ma risulta localizzato e fortemente dipendente dalla potenza dissipata, dalla posizione della cella e dalle condizioni meteorologiche stagionali.

8.2 Effetti cumulati

L'analisi ha permesso di valutare come gli effetti apprezzabili delle emissioni di calore dall'esercizio dei datacenter è confinato ad un intorno dell'installazione e si esaurisce, a livello del suolo, nell'intorno di circa 400 metri. Le variazioni minime e massime della temperatura dell'aria e dell'umidità relativa sono apprezzabili sono in corrispondenza dell'area di impianto.

In merito agli effetti cumulati tra i datacenter oggetto dello studio e i seguenti:

- Noovle Società Benefit S.p.A. (ID-13928 – In istruttoria) posto a 5,9 km a N
- Amazon data services italy s.r.l. (ID-14476 – In istruttoria) posto a 6,8 km a N-O
- APTO ITALIA S.R.L. (ID-13535 – In istruttoria) posto a 5,4 km a O.

si può concludere che dalle risultanze dello studio non ci sono evidenze di possibili interazioni né quindi di cumulo sugli effetti microclimatici dell'area vasta.

9 CONCLUSIONI

Il presente studio ha avuto l'obiettivo di valutare gli effetti microclimatici potenzialmente associati all'esercizio del nuovo Data Center Stack Campus di Siziano, con specifico riferimento alla possibile alterazione delle condizioni termoigrometriche locali, alla formazione di microclimi indotti dalla dissipazione di calore, alla stabilità atmosferica locale e alle condizioni di dispersione degli inquinanti. L'analisi è stata sviluppata mediante l'applicazione di un modello a box su griglia regolare 5 x 5, con passo spaziale pari a 400 m, alimentato con dati meteorologici orari e profili verticali ricostruiti mediante CALMET. Tale impostazione ha consentito di rappresentare, in modo fisicamente coerente e riproducibile, il contributo termico delle diverse celle emissive associate ai building del Data Center e la successiva redistribuzione dell'energia all'interno del dominio di calcolo. Il modello è stato costruito assumendo la conservazione dell'energia quale principio fondamentale, distribuendo il calore rilasciato dalle sorgenti sia in senso orizzontale, in funzione della distanza e della direzione del vento, sia lungo la verticale, in funzione del Mixing Height, della stabilità atmosferica e delle proprietà termo-fisiche dell'aria. L'approccio adottato è pertanto idoneo a una valutazione cautelativa degli effetti medi di scala locale.

L'inquadramento meteorologico dell'area di Siziano evidenzia condizioni tipiche della pianura lombarda, caratterizzate da una marcata stagionalità della capacità dispersiva. Nei mesi tardo-autunnali e invernali prevalgono condizioni meno favorevoli alla dispersione atmosferica, con elevata frequenza di classi di stabilità stabili, bassa ventilazione e ridotto sviluppo dello strato di rimescolamento. In particolare, la classe PGT 6 risulta pari al 62,50% delle ore in gennaio, al 61,96% in dicembre e al 64,44% in novembre, mentre il Mixing Height medio si attesta su valori contenuti, pari a 148,99 m in gennaio, 138,46 m in dicembre e 175,59 m in novembre. Anche la velocità media del vento risulta generalmente bassa, con valori medi mensili pari a 0,59 m/s in gennaio, 0,51 m/s in dicembre e 0,36 m/s in novembre. Tali condizioni rappresentano il contesto meteorologico potenzialmente più critico per l'accumulo locale degli effetti termici e, più in generale, per la dispersione degli inquinanti atmosferici. Viceversa, nei mesi primaverili ed estivi si osservano valori medi di Mixing Height più elevati, fino a circa 849 m in giugno, 835 m in luglio e 746 m in agosto, associati a una maggiore frequenza di condizioni instabili e quindi a una maggiore capacità di rimescolamento verticale.

I risultati modellistici mostrano che **la variazione di temperatura associata all'esercizio del Data Center è spazialmente localizzata e si concentra prevalentemente nelle celle direttamente interessate dalla presenza delle sorgenti termiche**, in particolare R2_C2 e R4_C4, con contributi secondari nelle celle R3_C2 e R3_C4. La cella R2_C2 rappresenta il contributo associato a MIL01, la cella R3_C2 quello associato a MIL02, la cella R4_C4 la somma delle emissioni di MIL08A, MIL08B e del 50% di MIL07, mentre la cella R3_C4 rappresenta il contributo di MIL03 e del restante 50% di MIL07. La distribuzione dei risultati conferma quindi una relazione diretta tra localizzazione delle potenze termiche dissipate e incremento medio di temperatura calcolato. Su scala mensile, il massimo incremento medio di temperatura si osserva nella cella R4_C4 nel mese di novembre, con valore pari a circa 2,04 °C, mentre nelle celle periferiche e non emissive le variazioni risultano generalmente dell'ordine di pochi millesimi o centesimi di grado. Ne consegue che **l'effetto termico medio non si manifesta come un'alterazione diffusa e omogenea dell'intero dominio, ma come un'anomalia locale centrata sulle celle emissive e progressivamente attenuata nelle celle circostanti**.

Il confronto con i riferimenti bibliografici disponibili conferma che l'ordine di grandezza dei risultati ottenuti è coerente con quanto riportato in letteratura per infrastrutture analoghe. Gli studi disponibili indicano infatti

che i data center possono determinare incrementi misurabili della temperatura dell'aria nelle aree circostanti, con valori medi locali dell'ordine di 0,7–0,9 °C e incrementi massimi puntuali fino a circa 2,2 °C. Tali valori sono da considerare come riferimenti di confronto e non come soglie direttamente trasferibili, poiché l'effetto effettivo dipende da potenza dissipata, configurazione impiantistica, quota di rilascio, presenza di ostacoli, condizioni anemologiche, stabilità atmosferica e altezza di rimescolamento. Nel caso in esame, il valore massimo medio mensile calcolato risulta confrontabile con gli ordini di grandezza massimi riportati in letteratura, ma è limitato alle celle direttamente interessate dalle maggiori emissioni termiche, mentre il resto del dominio mostra alterazioni significativamente inferiori.

Per quanto riguarda l'umidità relativa, i risultati evidenziano una riduzione localizzata della UR, coerente con il meccanismo fisico atteso in presenza di rilascio prevalente di calore sensibile. Poiché il modello assume assenza di apporto aggiuntivo di vapore acqueo, l'incremento di temperatura determina un aumento della pressione di saturazione e quindi una riduzione dell'umidità relativa a parità di contenuto assoluto di vapore. Tutte le variazioni calcolate risultano infatti negative. Le riduzioni più marcate si osservano nelle stesse celle in cui il ΔT è maggiore, in particolare R2_C2 e R4_C4, con contributi secondari in R3_C2 e R3_C4. La massima riduzione media mensile si registra nella cella R4_C4 nel mese di novembre, con valori dell'ordine di -11,77 punti percentuali, mentre nelle celle periferiche la variazione risulta generalmente molto più contenuta e spesso inferiore a pochi decimi o centesimi di punto percentuale. La riduzione di umidità relativa deve pertanto essere interpretata come effetto termoigrometrico indiretto del riscaldamento locale e non come modificazione del contenuto assoluto di vapore atmosferico.

Con riferimento alla stabilità atmosferica locale, **i risultati non evidenziano elementi tali da indicare una modifica strutturale del regime di stabilità atmosferica dell'area vasta**. Il modello applicato utilizza le classi di stabilità e il Mixing Height come condizioni meteorologiche di input e come parametri di modulazione della redistribuzione termica, ma non calcola una nuova classificazione meteorologica post operam. Sulla base degli incrementi termici ottenuti e della loro distribuzione spaziale, è comunque possibile concludere che **l'effetto del calore dissipato può produrre una limitata perturbazione termica locale nelle celle emissive, senza determinare una modifica apprezzabile del quadro micrometeorologico generale della macro area**. L'incremento di temperatura, infatti, risulta confinato prevalentemente ai volumi di controllo direttamente interessati dai building e tende a ridursi rapidamente allontanandosi dalle celle sorgente. Non emergono pertanto evidenze di una variazione estesa della stabilità atmosferica locale né di un'alterazione generalizzata dello strato limite atmosferico.

In merito alla possibile formazione di microclimi locali, lo studio evidenzia che l'esercizio del Data Center è in grado di generare anomalie termoigrometriche localizzate in corrispondenza delle aree di maggiore dissipazione termica. Tali anomalie possono essere definite come microclimi locali limitati alla scala delle celle emissive e delle aree immediatamente adiacenti, soprattutto nei mesi caratterizzati da condizioni meteorologiche meno dispersive. Tuttavia, l'estensione spaziale dell'effetto risulta contenuta: nelle celle non emissive e più distanti dai building il ΔT medio mensile si riduce a valori molto bassi, generalmente non significativi ai fini di una modifica del microclima complessivo della macro area. Pertanto, pur riconoscendo la presenza di un effetto microclimatico locale nelle immediate vicinanze delle sorgenti, non si evidenziano condizioni tali da configurare un'isola di calore estesa o una trasformazione termica diffusa dell'intero dominio di calcolo.

Per quanto riguarda le condizioni di dispersione degli inquinanti, l'analisi porta a una conclusione articolata. Da un lato, il rilascio di calore sensibile può generare localmente una maggiore tendenza al rimescolamento termico in prossimità della quota di emissione, soprattutto nelle celle interessate dalle maggiori potenze dissipate. Dall'altro lato, l'effetto calcolato rimane spazialmente limitato e non appare tale da modificare in modo sostanziale le condizioni dispersive della macro area, che continuano a essere governate principalmente dal campo meteorologico ricostruito con CALMET, dalla velocità e direzione del vento, dal Mixing Height e dalla stabilità atmosferica naturale del sito. In particolare, nei mesi invernali e tardo-autunnali permangono condizioni meteorologiche potenzialmente più critiche per la dispersione degli inquinanti, indipendentemente dal contributo termico del Data Center, a causa della maggiore frequenza di stabilità atmosferica e dei bassi valori di Mixing Height. L'effetto del Data Center deve quindi essere considerato come una perturbazione termica locale sovrapposta al quadro meteorologico esistente, ma non come un fattore in grado di modificare in modo apprezzabile il regime dispersivo complessivo dell'area vasta. In conclusione, lo studio consente di rispondere positivamente alla richiesta di valutazione degli effetti microclimatici associati all'esercizio del Data Center nella macro area. Le elaborazioni mostrano che l'esercizio dei building determina un incremento locale della temperatura e una corrispondente riduzione dell'umidità relativa, entrambi concentrati nelle celle emissive e nelle immediate adiacenze. Gli effetti risultano più evidenti nei mesi con condizioni atmosferiche meno favorevoli alla dispersione, in particolare nel periodo tardo-autunnale e invernale, e meno marcati nei mesi caratterizzati da maggiore sviluppo dello strato di rimescolamento. Non emergono tuttavia elementi tali da indicare una modifica significativa della stabilità atmosferica a scala di macro area, né una formazione di microclimi estesi oltre l'intorno delle celle direttamente interessate dalle sorgenti termiche. Analogamente, non si evidenziano alterazioni sostanziali delle condizioni generali di dispersione degli inquinanti, che restano principalmente determinate dalla meteorologia locale. **L'impatto microclimatico può quindi essere classificato come localizzato, fisicamente riconoscibile nelle aree di maggiore dissipazione termica, ma non tale da determinare una modificazione diffusa o strutturale del microclima della macro area di Siziano**.

Con riferimento agli effetti cumulati dati dalla presenza di altri data center nel territorio in esame, in considerazione della distanza degli stessi (minima pari a circa 5,5km dall'area in esame) **si può concludere che dalle risultanze dello studio non ci sono evidenze di possibili interazioni né quindi di cumulo sugli effetti microclimatici dell'area vasta.**

10 BIBLIOGRAFIA

- Sailor, D. J., et al. (2026). Data Center Waste Heat as an Emerging Urban Thermal Hazard: First Field Measurements of Neighborhood-Scale Air Temperature Impacts. ASME Journal of Engineering for Sustainable Buildings and Cities, 7(2), 024501. *Studio basato su misure in campo delle temperature dell'aria sopra/sottovento rispetto a data center, con evidenza di incrementi locali fino a circa 4 °F, cioè circa 2,2 °C.*
- Marinoni, A., Lio', P., Cambria, E., Dal Zilio, L., Lin, W., Dalla Mura, M., Chanussot, J., Ragusa, E., Mengaldo, G., Tso, C. Y., Zhu, Y., & Horton, B. (2026). The data heat island effect: quantifying the impact of AI data centers in a warming world. arXiv:2603.20897. *Preprint che analizza data center AI hyperscale mediante dati di temperatura superficiale da telerilevamento, stimando un aumento medio della land surface temperature di circa 2 °C dopo l'avvio dell'esercizio.*
- Electric Power Research Institute — EPRI. (2024). Data Center Heat Recovery. Technical Brief. *Documento tecnico sul recupero del calore da data center; utile per inquadrare il fatto che il calore generato dai server e dai sistemi ausiliari è spesso rigettato in atmosfera quando non recuperato.*
- European Data Centre Association — EUDCA. (2024). An Introduction to Data Centre Heat Reuse. White Paper, Technical Committee. *White paper tecnico sul riutilizzo del calore dei data center; riporta che quasi il 100% dell'elettricità consumata dagli apparati IT viene dissipata come calore di scarto.*
- EOLIOS Ingénierie. (s.d.). External CFD Simulation for Data Center. Technical note / engineering case material. *Riferimento tecnico-applicativo sull'uso della CFD esterna per data center, con analisi di flussi d'aria, distribuzione della temperatura, vapore acqueo e umidità relativa in differenti scenari operativi e meteorologici.*
- Wang, A., Li, X.-X., Xin, R., & Chew, L. W. (2023). Impact of Anthropogenic Heat on Urban Environment: A Case Study of Singapore with High-Resolution Gridded Data. Atmosphere, 14(10), 1499. *Studio WRF/SLUCM con dati di calore antropogenico ad alta risoluzione spaziale e temporale; riporta incrementi massimi spazialmente mediati della temperatura a 2 m fino a 1,44 °C e incrementi locali fino a 1,7 °C in alcune celle.*
- Salamanca, F., Georgescu, M., Mahalov, A., Moustaoui, M., & Wang, M. (2014). Anthropogenic heating of the urban environment due to air conditioning. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 119, 5949–5965. *Studio modellistico sull'effetto del calore dissipato dagli impianti di climatizzazione in ambiente urbano; mostra incrementi notturni della temperatura dell'aria a 2 m superiori a 1 °C in alcune aree urbane.*
- Sailor, D. J. (2011). A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. International Journal of Climatology, 31, 189–199. *Review metodologica utile per l'impostazione concettuale della stima delle emissioni di calore antropogenico e, dove pertinente, di umidità in ambiente urbano; citata anche nella letteratura successiva sul tema del calore antropogenico urbano.*